

## **Agradecimentos**

Ao meu orientador, Doutor Eric Didier, sem o qual seria praticamente impossível a realização desta tese. Agradeço a oportunidade e confiança que me deu, assim como toda a ajuda, disponibilidade e sobretudo paciência demonstradas ao longo destes meses.

À minha família, por estar sempre perto quando precisei, principalmente os meus pais e a minha irmã.

À minha namorada, que me deu um apoio incondicional ao longo destes anos todos.

Aos meus amigos e colegas que sempre me apoiaram.



## Resumo

A construção de parques de estacionamento subterrâneos surge com o intuito de facilitar o estacionamento. No entanto, devido ao confinamento do espaço de estacionamento, é necessário, na maioria dos casos, instalar um sistema de ventilação forçada.

O presente trabalho tem como objectivo analisar, recorrendo à simulação numérica, a ventilação forçada no piso de um parque de estacionamento subterrâneo por meio de ventiladores axiais (insuflação/extracção de ar) em conjunto com ventiladores de impulso colocados no tecto. No âmbito deste trabalho foi analisado, e, posteriormente, calibrado o escoamento induzido por um ventilador de impulso numérico. O jacto produzido pelo ventilador de impulso é composto por uma componente de velocidade axial e de uma componente tangencial (swirl). Esta componente tangencial é determinada no presente trabalho, com o auxílio de dados experimentais e a comparação com estes dados. Posteriormente, analisou-se os escoamentos induzidos por um conjunto de ventiladores de impulso e a sensibilidade dos resultados numéricos em função de vários parâmetros, tais como a dimensão da fonte de calor, o pé direito, etc.

Com os resultados obtidos é modelada a ocorrência de um incêndio num piso de um parque de estacionamento real, verificando-se, para diversas configurações do sistema de ventilação, a eficiência do sistema na evacuação dos gases quentes libertados pelo incêndio. A avaliação é realizada através da análise da temperatura no piso do parque, que permite ter uma estimativa do confinamento dos gases quentes libertados pelo incêndio.

Foi também estudada a evolução temporal do incêndio. O confinamento dos gases quentes é analisado comparando os resultados da modelação numérica estacionária e transitória.

## Palavras-chave

Parque de estacionamento subterrâneo; ventilador axial; ventilador de impulso; swirl; incêndio; confinação.







## **Abstract**

The construction of underground car parks has the purpose of facilitating parking. However, due to the confinement of the parking space it's necessary in the majority of cases, to install a forced ventilation system.

The present work has as objective to analyze, appealing to the numerical simulation, the ventilation forced in the floor of a park of underground parking by means of axial fans (inflation/exhaust of air) in set with placed fans of impulse placed on the ceiling. In the scope of this work it was analyzed, and, later, calibrated the induced draining for a fan of numerical impulse. The jet produced by the impulse fan consists of an axial velocity component and a tangential component (swirl). This tangential component is determined in the present work, with the help and comparison of experimental data. Later, flow induced was analyzed by a set of impulse fans and the sensitivity of the numerical results in function of some parameters, such as the dimension of the heat source, the right foot, etc.

According to the results, is modeled a fire in a parking level. For the several configurations of the ventilation system, the efficiency of the evacuation of the hot gases released by fire was checked. The evaluation is done by analyzing the temperature in the floor of the park, which gives an estimate of the confinement of hot gases released by fire.

The time evolution of the fire was also studied. The confinement of hot gases is analyzed using field temperature we also analyze the results of permanent and transient modeling.

## **Keywords**

Underground parking; axial fan; fan drive; swirl; fire; confinement.









---

## Índice geral

|                                                                                  |           |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Introdução .....</b>                                                       | <b>1</b>  |
| <b>1.1 Considerações Gerais .....</b>                                            | <b>1</b>  |
| <b>1.2 Objectivos e metodologia.....</b>                                         | <b>2</b>  |
| 1.2.1 Modelação e calibração numérica de um ventilador de impulso numérico ..... | 3         |
| 1.2.2 Modelação de um parque de estacionamento subterrâneo de estudo .....       | 4         |
| 1.2.3 Modelação de um parque de estacionamento subterrâneo real .....            | 4         |
| <b>1.3 Organização do trabalho.....</b>                                          | <b>5</b>  |
| <b>2. Enquadramento do trabalho .....</b>                                        | <b>7</b>  |
| <b>3. Modelação numérica .....</b>                                               | <b>13</b> |
| <b>3.1 Equações de Navier Stokes .....</b>                                       | <b>14</b> |
| <b>3.2 Reynolds Averaged Navier-Stokes; RANS equations .....</b>                 | <b>15</b> |
| 3.2.1 Modelos de turbulência com duas equações .....                             | 16        |
| <b>3.3 Esquema Numérico Utilizado .....</b>                                      | <b>18</b> |
| <b>3.4 Malha .....</b>                                                           | <b>20</b> |
| <b>4. Calibração do Ventilador de Impulso .....</b>                              | <b>21</b> |
| <b>4.1 Introdução .....</b>                                                      | <b>21</b> |
| <b>4.2 Formulação do problema.....</b>                                           | <b>22</b> |
| 4.2.1 Domínio computacional e sua discretização .....                            | 25        |
| 4.2.2 Parâmetros da modelação numérica .....                                     | 29        |
| <b>4.3 Resultados .....</b>                                                      | <b>30</b> |
| 4.3.1 Influência do pé direito no escoamento .....                               | 36        |
| 4.3.2 Influência da malha para as simulações efectuadas.....                     | 39        |
| 4.3.3 Importância da velocidade tangencial “SWIRL” .....                         | 42        |
| <b>4.4 Conclusões .....</b>                                                      | <b>45</b> |

---

|                                                                                                                                           |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>5. Parque Simplificado .....</b>                                                                                                       | <b>47</b> |
| <b>5.1 Introdução .....</b>                                                                                                               | <b>47</b> |
| <b>5.2 Formulação do problema .....</b>                                                                                                   | <b>48</b> |
| 5.2.1 Domínio computacional e condição limite .....                                                                                       | 50        |
| 5.2.2 Parâmetros da modelação numérica .....                                                                                              | 53        |
| <b>5.3 Resultados .....</b>                                                                                                               | <b>55</b> |
| 5.3.1 Incêndio no interior do domínio computacional.....                                                                                  | 56        |
| 5.3.2 Intensidade da fonte de calor .....                                                                                                 | 56        |
| 5.3.3 Influência do volume para a situação de incêndio.....                                                                               | 58        |
| 5.3.4 Influência da malha para as simulações efectuadas.....                                                                              | 68        |
| 5.3.5 Influência do modelo de turbulência .....                                                                                           | 69        |
| <b>5.4 Conclusões .....</b>                                                                                                               | <b>71</b> |
| <b>6. Estudo de desenfumagem de um parque .....</b>                                                                                       | <b>73</b> |
| <b>6.1 Introdução .....</b>                                                                                                               | <b>73</b> |
| <b>6.2 Formulação do problema .....</b>                                                                                                   | <b>74</b> |
| 6.2.1 Domínio computacional e condições limite .....                                                                                      | 75        |
| <b>6.3 Influência do modelo de turbulência .....</b>                                                                                      | <b>79</b> |
| <b>6.4 Estudo de diferentes configurações do sistema de desenfumagem .....</b>                                                            | <b>80</b> |
| 6.4.1 1ª Configuração: V1 e V3 em extracção a 100%; V2 e V4 em insuflação a 65% ..                                                        | 80        |
| 6.4.2 2ª Configuração: V1 e V3 em extracção a 100%; V2 e V4 em insuflação a 100%; V6 fechado.....                                         | 81        |
| 6.4.3 3ª Configuração: V1 e V3 em extracção a 100%; V2 e V4 em insuflação a 100%; V6 aberto. ....                                         | 82        |
| 6.4.4 4ª Configuração: Ventiladores de insuflação e extracção a funcionar a 100% e os ventiladores de impulso todos em funcionamento..... | 83        |
| 6.4.4 5ª Configuração: ventiladores de impulso, sem swirl.....                                                                            | 84        |

|                                                                        |            |
|------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.4.5 Conclusões.....                                                  | 85         |
| <b>6.5 Regime não estacionário .....</b>                               | <b>88</b>  |
| 6.5.1 Dados da simulação numérica para o regime não estacionário ..... | 90         |
| 6.5.2 Resultados.....                                                  | 91         |
| 6.5.3 Conclusões.....                                                  | 96         |
| <b>7. Conclusões .....</b>                                             | <b>99</b>  |
| <b>8. Referências Bibliográficas .....</b>                             | <b>103</b> |
| <b>9. Anexos.....</b>                                                  | <b>105</b> |









## Índice de figuras

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1- Conduas de insuflação/extracção de ar.....                                                                                                  | 7  |
| Figura 2.2 - Ventilador de impulso.....                                                                                                                 | 8  |
| Figura 2.3 - Extracção de fumo proveniente de uma fonte de calor.....                                                                                   | 9  |
| Figura 2.4 - Incêndio na zona virtual: zona 2 .....                                                                                                     | 10 |
| Figura 2.5 - Incêndio na zona virtual: zona 1 .....                                                                                                     | 11 |
| Figura 4.1 - Ventilador de impulso: num parque de estacionamento .....                                                                                  | 22 |
| Figura 4.2 - Dimensões do modelo numérico de ventilador de impulso .....                                                                                | 23 |
| Figura 4.3 - Perfil da variação da componente tangencial da velocidade .....                                                                            | 25 |
| Figura 4.4 - Domínio computacional: para a calibração do ventilador de impulso.....                                                                     | 26 |
| Figura 4.5 - Malha do domínio computacional: pé direito de 10m .....                                                                                    | 27 |
| Figura 4.7 - Discretização vertical: plano $y=0m$ .....                                                                                                 | 28 |
| Figura 4.6 -Discretização horizontal: plano $z=2,25m$ .....                                                                                             | 28 |
| Figura 4.8 - Plano horizontal de referência e representação de algumas linhas para os perfis de velocidade.....                                         | 30 |
| Figura 4.9 - Perfis de velocidade $U_x$ : $v_{tg}$ : 6,75m/s, 9,0m/s, 11,25m/s e 13,5m/s.....                                                           | 33 |
| Figura 4.10 - Perfis de velocidade $U_x$ : $v_{tg}$ : 10,125m/s, 11,25m/s e 12,375m/s.....                                                              | 35 |
| Figura 4.11 - Perfis da componente, $U_x$ , da velocidade: influência do pé direito (2,5m e 10m) .....                                                  | 37 |
| Figura 4.12 - Componente $U_x$ da velocidade no plano horizontal que passa pelo centro do ventilador de impulso para $v_{tg}=11,25m/s$ e $z=2,5m$ ..... | 38 |
| Figura 4.13 - Componente $U_x$ da velocidade no plano horizontal que passa pelo centro do ventilador de impulso, para $v_{tg}=11,25m/s$ e $z=10m$ ..... | 38 |
| Figura 4.14 - Influência da malha nos perfis da componente horizontal da velocidade para o pé direito 2,5m.....                                         | 40 |

|                                                                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.15 - Influência da malha nos perfis da componente horizontal da velocidade para o pé direito de 10m .....                                                   | 41 |
| Figura 4.16 - Comparação dos perfis de velocidade para os dois modelos numéricos de ventilador de impulso, com e sem swirl e os dois pés direito, de 2,5m e 10m..... | 43 |
| Figura 4.17 - Componente $U_x$ da velocidade no plano horizontal de referência: $v_{tg}=11,25\text{m/s}$ e $z=10\text{m}$ .....                                      | 44 |
| Figura 4.18 - Componente $U_x$ da velocidade no plano horizontal no plano de referência: $v_{tg}=0\text{m/s}$ e $z=10\text{m}$ .....                                 | 44 |
| Figura 5.1 - Divisão de um parque de estacionamento em zonas virtuais .....                                                                                          | 48 |
| Figura 5.2 - Alcance e abertura do escoamento induzido pelo ventilador de impulso.....                                                                               | 49 |
| Figura 5.3 - Domínio computacional: parque simplificado.....                                                                                                         | 50 |
| Figura 5.4 - Malha do domínio computacional: parque simplificado .....                                                                                               | 51 |
| Figura 5.5 - Secção da discretização horizontal do domínio computacional, parque simplificado: plano $z=2,25\text{m}$ .....                                          | 53 |
| Figura 5.6 - Discretização vertical adoptada para o parque simplificado: plano $y=0\text{m}$ .....                                                                   | 53 |
| Figura 5.7 - Plano de referência para o parque simplificado: $z=2,25\text{m}$ e as linhas longitudinais .....                                                        | 55 |
| Figura 5.8 - Local da fonte de calor.....                                                                                                                            | 56 |
| Figura 5.9 - Campo de temperatura para uma fonte de energia de 1MW: plano $z=2,25\text{m}$ .....                                                                     | 57 |
| Figura 5.10 - Campo de temperatura para uma fonte de energia de 4MW: plano $z=2,25\text{m}$ ....                                                                     | 57 |
| Figura 5.11 - Evolução da temperatura no domínio computacional: plano horizontal $z=1,5\text{m}$                                                                     | 60 |
| Figura 5.12 - Evolução da temperatura ao longo do domínio computacional: plano de referência .....                                                                   | 63 |
| Figura 5.13 - Campo de temperatura para o pé direito de 2,5m e 4,5m: foco de incêndio .....                                                                          | 64 |
| Figura 5.14 - Campo de temperatura para o volume de $7,7\text{m}^3$ : pé direito 2,5m e 4,5m.....                                                                    | 65 |
| Figura 5.15 - Campo de temperatura para os 3 volumes: $3,5\text{ m}^3$ ; $7,7\text{ m}^3$ e $15,4\text{ m}^3$ .....                                                  | 66 |

|                                                                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 5.16 - Campo de temperatura para o volume de 7,7m <sup>3</sup> e pé direito de 2,5m: com e sem swirl .....                                                                                                | 67 |
| Figura 5.17 - Variação da temperatura, malha fina malha grosseira: plano de referência, z=2,25m .....                                                                                                            | 68 |
| Figura 5.18 - Campo de temperatura, modelo de turbulência <i>K -<math>\epsilon</math> Standard</i> e modelo <i>K -<math>\epsilon</math> Realizable</i> : plano de referência z=2,25m .....                       | 70 |
| Figura 6.1 - Plano do piso -4 do parque de estacionamento: posição dos ventiladores de impulso, das grelhas dos ventiladores axiais e sentido de funcionamento .....                                             | 74 |
| Figura 6.2 - Vista 3D do piso -4 do parque de estacionamento da Brisa .....                                                                                                                                      | 76 |
| Figura 6.3 - Vista 3D da malha do domínio computacional: Paredes, grelhas dos ventiladores axiais, ventiladores de impulso e bloco de escadas .....                                                              | 76 |
| Figura 6.4 - Planta do piso -4 do parque de estacionamento: posição do local de incêndio ....                                                                                                                    | 78 |
| Figura 6.5 - Comparação entre os modelos de turbulência: <i>K -<math>\epsilon</math> Standard</i> e <i>K -<math>\epsilon</math> Realizable</i> para a 2ª situação de incêndio: plano de referência z=2,75m ..... | 79 |
| Figura 6.6 - Campo de temperatura para a 1ª configuração de incêndio: plano horizontal z=2,75m .....                                                                                                             | 81 |
| Figura 6.7 - Campo de temperatura para a 2ª configuração de incêndio: plano horizontal z=2,75m .....                                                                                                             | 82 |
| Figura 6.8 - Campo de temperatura para a 3ª situação de incêndio: plano horizontal z=2,75m .....                                                                                                                 | 83 |
| Figura 6.9 - Campo de temperatura para a 4ª situação de incêndio: plano horizontal z=2,75m .....                                                                                                                 | 84 |
| Figura 6.10 - Campo da temperatura em caso de incêndio: ventiladores de impulso em funcionamento sem swirl: plano z=2,75m .....                                                                                  | 85 |
| Figura 6.11 - Comparação do campo de temperatura para os ventiladores axiais de insuflação: configuração 1 e 3 .....                                                                                             | 86 |
| Figura 6.12 - Comparação das linhas de corrente para os ventiladores axiais de insuflação: ..                                                                                                                    | 86 |

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 6.13 - Comparação do campo de temperatura em caso de incêndio para os dois modelos numéricos de ventiladores de impulso: swirl / sem swirl ..... | 87 |
| Figura 6.14 - Comparação das linhas de corrente em caso de incêndio para os dois modelos numéricos de ventiladores de impulso: swirl / sem swirl.....   | 87 |
| Figura 6.15 - Taxa de libertação de calor VS tempo .....                                                                                                | 89 |
| Figura 6.16 - Taxa de libertação de calor VS tempo, Comissão Europeia.....                                                                              | 89 |
| Figura 6.17 - Taxa de libertação de calor Vs tempo, utilizado na simulação numérica.....                                                                | 90 |
| Figura 6.18 - Local de incêndio.....                                                                                                                    | 91 |
| Figura 6.19 - Campo de temperatura após 5min: planos xx e planos yy.....                                                                                | 92 |
| Figura 6.20 - Campo de temperatura após 10min: planos xx e planos yy.....                                                                               | 92 |
| Figura 6.21 - Campo de temperatura após 15min: Planos xx e planos yy .....                                                                              | 92 |
| Figura 6.22 - Campo de temperatura após 20min: Planos xx e planos yy .....                                                                              | 93 |
| Figura 6.23 - Campo de temperatura após 25min: Planos xx e planos yy .....                                                                              | 93 |
| Figura 6.24 - Campo de temperatura após 30min: Planos xx e planos yy .....                                                                              | 93 |
| Figura 6.25 - Campo de temperatura após 35min: Planos xx e planos yy .....                                                                              | 94 |
| Figura 6.26 - Campo de temperatura após 40min: Planos xx e planos yy .....                                                                              | 94 |
| Figura 6.27 - Campo de temperatura após 45min: Planos xx e planos yy .....                                                                              | 94 |
| Figura 6.28 - Campo de temperatura após 50min: Planos xx e planos yy .....                                                                              | 95 |
| Figura 6.29 - Comparação do campo de temperatura: regime estacionário e regime transitório (30min). .....                                               | 96 |

## Índice de Tabelas

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 4.1 - Características das malhas utilizadas .....                      | 27 |
| Tabela 5.1 - Características das malhas utilizadas: parque simplificado ..... | 52 |









# 1. Introdução

## 1.1 Considerações Gerais

Com o desenvolvimento das sociedades assiste-se ao crescimento de grandes áreas metropolitanas. Este crescimento origina nas cidades, um grave problema de mobilidade, com uma invasão diária de veículos.

A entrada diária de veículos origina problemas incontornáveis, tais como, problemas ambientais, problemas de circulação e problemas de estacionamento. O estacionamento dentro das cidades, com o número crescente de veículos, torna-se difícil, os automobilistas optam frequentemente por um estacionamento selvagem, em cima dos passeios e outros locais inapropriados.

As entidades políticas têm assim um grande desafio, devolver a cidade aos cidadãos. Para tal é necessário solucionar os problemas de mobilidade no interior das cidades. Uma das soluções passa por encontrar estacionamento para os veículos, através da construção de parques de estacionamento subterrâneos. É uma solução, que a nível físico traz às cidades uma grande vantagem, pois não necessita de uma grande área física disponível e fornece uma capacidade de parqueamento muito relevante. Esta capacidade é de extrema importância quando se assiste à construção de grandes infra-estruturas, tais como, grandes superfícies comerciais, hospitais, estádios de futebol, etc. A opção pela construção de parques de estacionamento subterrâneos é a melhor opção a nível económico, aproveitando-se a área útil de construção (pisos inferiores) e oferecendo aos utilizadores uma maior comodidade e conforto. A sua construção fornece às cidades uma grande vantagem urbanística pois os veículos deixam de estar parqueados na via pública de forma selvagem.

Os parques de estacionamento subterrâneo não necessitam de climatização, mas a ventilação é indispensável. Os gases nocivos emitidos pelos veículos, **CO** (monóxido de carbono, que é altamente letal), os **NOx** (óxidos de azoto, venenosos) são extremamente prejudiciais para a saúde, pelo que é exigido a ventilação dos parques. A ventilação tem de cumprir a normalização e regulamentação existente.

Por vezes a ventilação natural não é suficiente e pode verificar-se a acumulação de gases nocivos no interior do parque. Esta acumulação pode-se dever à dimensão física do parque de estacionamento (área, assim como pé direito) como à quantidade de veículos no seu interior.

A ventilação forçada é assim, na maioria dos casos, realizada com auxílio de ventiladores, chamados ventiladores axiais. Estes ventiladores permitem a evacuação de gases nocivos do interior do parque. No entanto, só a utilização destes ventiladores de exaustão não assegura uma circulação de ar suficiente para a ventilação diária e ainda menos em caso de incêndio, onde grande quantidade de gases emitidos deve ser evacuada. O sistema de ventiladores axiais é assim assistido por um conjunto de ventiladores de impulso, colocado no tecto do parque de estacionamento. Este sistema de ventilação permite igualmente direccionar os fumos em direcção dos ventiladores axiais de extracção.

### **1.2 Objectivos e metodologia**

O objectivo deste projecto consiste em analisar a insuflação e extracção de ar num parque de estacionamento subterrâneo. Com a legislação existente, no que diz respeito à concentração de gases no interior de um parque, é necessário determinar o melhor modo de proceder à evacuação destes gases.

Um parque de estacionamento tem como finalidade, um baixo custo de construção e de manutenção, sendo assim necessário determinar a escolha do melhor equipamento bem como da sua disposição no interior do parque de estacionamento. Para se realizar este projecto é necessário conhecer aspectos essenciais, como a dimensão do parque de estacionamento, número de veículos estimados, assim como o pé direito do parque.

Existem estudos numéricos de parques de estacionamento. No entanto, alguns destes estudos não contabilizam a componente rotacional da velocidade, ou swirl, gerada pelos ventiladores de impulso (Veiga et al., 2009) (Viegas, 2009). O presente trabalho tem como objectivo modelar e calibrar um modelo numérico de um ventilador de impulso que toma em conta o swirl e efectuar um estudo de sensibilidade do modelo numérico considerando um parque simples, parque simplificado. Com os conhecimentos adquiridos é modelado posteriormente, um incêndio num parque de estacionamento subterrâneo, e, são avaliadas as diferentes configurações do funcionamento do sistema de desenfumagem.

O plano de trabalho é dividido em três partes:

- Modelação e calibração de um ventilador de impulso numérico.
- Modelação de um parque de estacionamento subterrâneo de estudo.
- Modelação de um incêndio num parque de estacionamento real.

### **1.2.1 Modelação e calibração numérica de um ventilador de impulso numérico**

A modelação numérica do ventilador de impulso é precedida do auxílio do software FLUENT, um programa numérico de CFD (Computational Fluid Dynamics). As simulações numéricas vão permitir a calibração do modelo numérico do ventilador de impulso.

1. O modelo de ventilador de impulso numérico é considerado como uma “caixa rectangular vazia”, onde se aplica uma condição de velocidade na face de aspiração e de insuflação do modelo de ventilador de impulso.

2. São considerados vários factores na modelação do ventilador de impulso numérico:

- Influência do refinamento da malha: malha fina e malha grosseira, malha típica utilizada na modelação de parques de estacionamento.
- Influência do pé direito no escoamento provido pelo ventilador de impulso.
- Influência da intensidade da componente tangencial da velocidade no escoamento induzido pelo modelo de ventilador de impulso.

Os resultados obtidos na modelação numérica do ventilador de impulso são analisados e comparados com dados obtidos experimentalmente.

### 1.2.2 Modelação de um parque de estacionamento subterrâneo de estudo

Procede-se à modelação de um parque de estacionamento subterrâneo simples, dito de estudo.

É modelado um incêndio numa zona crítica do parque. Para tal é utilizada uma fonte de calor apropriada e simula-se a desenfumagem do parque. Nesta parte são realizadas simulações numéricas com diferentes características com o objectivo de definir a sensibilidade do modelo para as características seguintes:

- Variação da fonte de calor, 1MW e 4MW.
- Variação do volume da fonte de calor, 7,7 m<sup>3</sup> 15,4 m<sup>3</sup> e 3,5 m<sup>3</sup>.
- Pé direito normal, 2,5m, e pé direito de 4,5m.
- Para condições de incêndio idênticas, analisa-se a desenfumagem do parque com dois modelos de ventiladores de impulso. Com o mesmo caudal, ou seja, igual componente axial da velocidade e apenas um modelo numérico do ventilador de impulso contabiliza a componente tangencial da velocidade (swirl).
- Modelo de turbulência: *K - $\epsilon$  Standart* e outro modelo de turbulência *K - $\epsilon$  Realizable*.

Com os resultados obtidos nos diferentes casos de simulação numérica, pode-se definir critérios que permitem a melhor modelação numérica de um sistema de ventilação/desenfumagem.

### 1.2.3 Modelação de um parque de estacionamento subterrâneo real

Com os resultados obtidos nos estudos anteriores, procede-se a modelação da desenfumagem de um piso de um parque de estacionamento subterrâneo real. Mantêm-se inalterados os requisitos impostos no projecto.

### 1.3 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em 6 capítulos e 1 anexo.

Na introdução, capítulo 1, apresentam-se os objectivos e a organização do documento.

No capítulo 2, apresenta-se o enquadramento do trabalho e refere-se a importância da ventilação forçada em parques de estacionamento subterrâneos, assim como os métodos utilizados. Refere-se a importância dos sistemas da ventilação forçada no caso de ocorrer um incêndio no interior do parque de estacionamento subterrâneo.

No capítulo 3, descreve-se o modelo numérico utilizado. As equações de Navier-Stokes escritas em função dos valores médios de Reynolds incluídas no código FLUENT, com os respectivos modelos de turbulência e condições de fronteira.

No capítulo 4, procede-se à modelação e calibração de um ventilador de impulso comercial. A calibração consiste em qualificar e quantificar a existência de uma componente tangencial da velocidade (swirl) provida por um ventilador de impulso. O modelo do ventilador de impulso é o AXALU TR-40 da empresa France-Air. A calibração é precedida em função da comparação dos resultados obtidos numericamente com resultados experimentais. Os resultados experimentais foram obtidos por duas entidades distintas, o LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) e a France-Air.

No capítulo 5, procede-se à análise numérica de um parque simples, dito parque de estudo simplificado. No seu interior estão colocados 9 ventiladores de impulso. É analisada a resposta dos ventiladores de impulso em caso de incêndio: utiliza-se uma fonte de calor de 1MW e 4MW; altera-se o volume da fonte de calor; modelo de turbulência; malha e o pé direito.

No capítulo 6, é analisado um parque de estudo real. É colocada uma fonte de calor no seu interior e procede-se a simulações numéricas de modo a determinar a melhor configuração do sistema de extracção dos gases quentes e tóxicos. As alterações dizem respeito às condições de funcionamento dos ventiladores axiais e dos ventiladores de impulso. Foi realizada uma simulação numérica em regime transitório para a qual se analisou a evolução da temperatura num período de tempo típico do desenvolvimento de um incêndio.

O capítulo 7 apresenta as conclusões relevantes deste trabalho com base nas conclusões retiradas nos capítulos anteriores.

No último capítulo do trabalho, capítulo 8, apresentam-se as referências bibliográficas utilizadas no presente trabalho.

Incluem-se dois anexos: no anexo I) apresentam-se dados característicos do ventilador de impulso AXALU-TR 40 e no anexo II) apresentam-se os dados característicos referentes ao outro ventilador de impulso utilizado, o AXALU-TR 35.

### 2. Enquadramento do trabalho

A ventilação de um parque de estacionamento subterrâneo pode ser realizada de modos distintos. Tradicionalmente, a ventilação natural, neste tipo de espaços, é assegurada por aberturas praticadas na envolvente da edificação. A ventilação forçada é realizada através de aberturas de admissão e exaustão de ar servidas por uma rede de condutas (figura 2.1). No entanto, esta rede de condutas ocupa bastante espaço físico dos parques, que são de grandes dimensões e com um pé direito baixo, o que torna a ventilação forçada por meio de condutas de difícil aplicação e com elevado custo.



**Figura 2.1-** Condutas de insuflação/extracção de ar

O outro modo de ventilação forçada num parque de estacionamento é por meio de ventiladores axiais e de ventiladores de impulso (figura 2.2). Esta configuração tem uma aplicação mais simples que o estabelecimento de uma rede de condutas, pois requer apenas ventiladores de insuflação e extracção colocados nas extremidades do parque (tradicionalmente nas paredes) e de ventiladores de impulso (colocados no tecto). Os ventiladores de insuflação (ou compensação) permitem a insuflação de ar novo no interior do parque, enquanto os ventiladores de extracção asseguram a remoção de gases quentes e tóxicos, que podem aparecer em caso de incêndio.



**Figura 2.2** - Ventilador de impulso

Os ventiladores de impulso são colocados no tecto do parque de estacionamento de modo estratégico e podem ser 100% reversíveis. Os ventiladores de impulso têm duas velocidades de funcionamento. Este funcionamento é determinado pela concentração de **CO** (monóxido de carbono): quando a concentração de **CO** atinge 50ppm, o ventilador de impulso assume o seu funcionamento com um caudal baixo, dito caudal mínimo. Assim que a concentração de **CO** toma valores mais elevados (valores superiores a 100ppm) o funcionamento do ventilador altera-se, passa a funcionar com uma velocidade mais elevada, isto é, com caudal duplo do modo de funcionamento precedente.

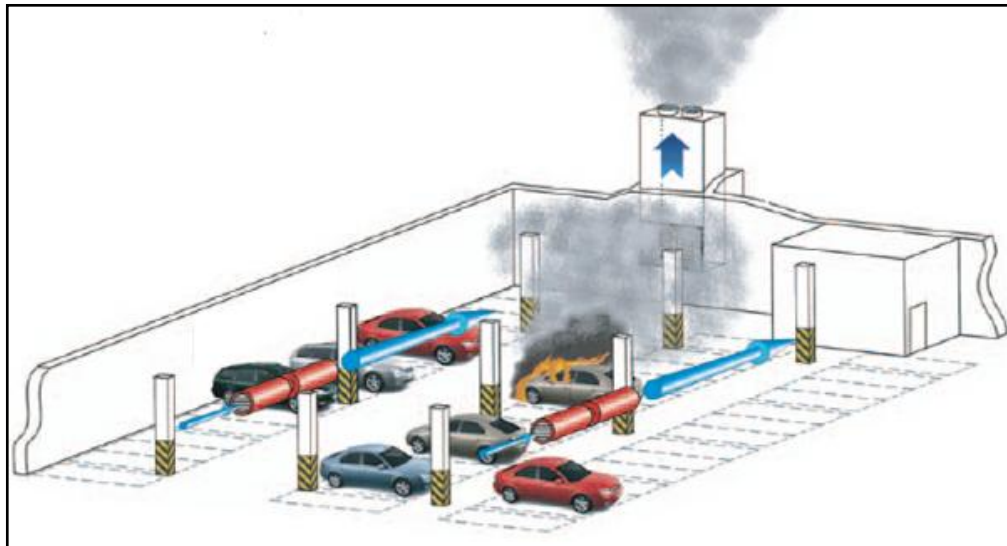
A combinação dos ventiladores axiais e de impulso permite a boa mistura do ar, reduzindo as concentrações locais de poluente. Os ventiladores de impulso dirigem o ar viciado através do parque até aos ventiladores de extracção, permitindo assim a sua extracção para o exterior.

A colocação do ventilador de impulso é algo preponderante no dimensionamento de um parque de estacionamento subterrâneo. O posicionamento correcto dos ventiladores de impulso permite uma normal circulação de ar e evita que se originem locais de estagnação de gases no interior do parque.

A configuração do sistema de ventilação adoptada para a ventilação diária do parque é também utilizada no caso de ocorrer um incêndio (figura 2.3). Em geral, os parques de estacionamento subterrâneos apresentam um pé direito reduzido e ocupam grandes áreas, o que é propício à rápida propagação do fumo, que contamina locais distantes do foco de



incêndio, comprometendo as condições de habitabilidade. Os parques de estacionamento subterrâneos encontram-se, como o nome indica, em pisos inferiores ou subterrâneos dos edifícios, de modo que um incêndio não controlado no seu interior pode comprometer não só a sua integridade, como também a de todo o edifício, geralmente densamente povoado. Devido a estas condicionantes, os níveis de segurança são cada vez mais elevados.



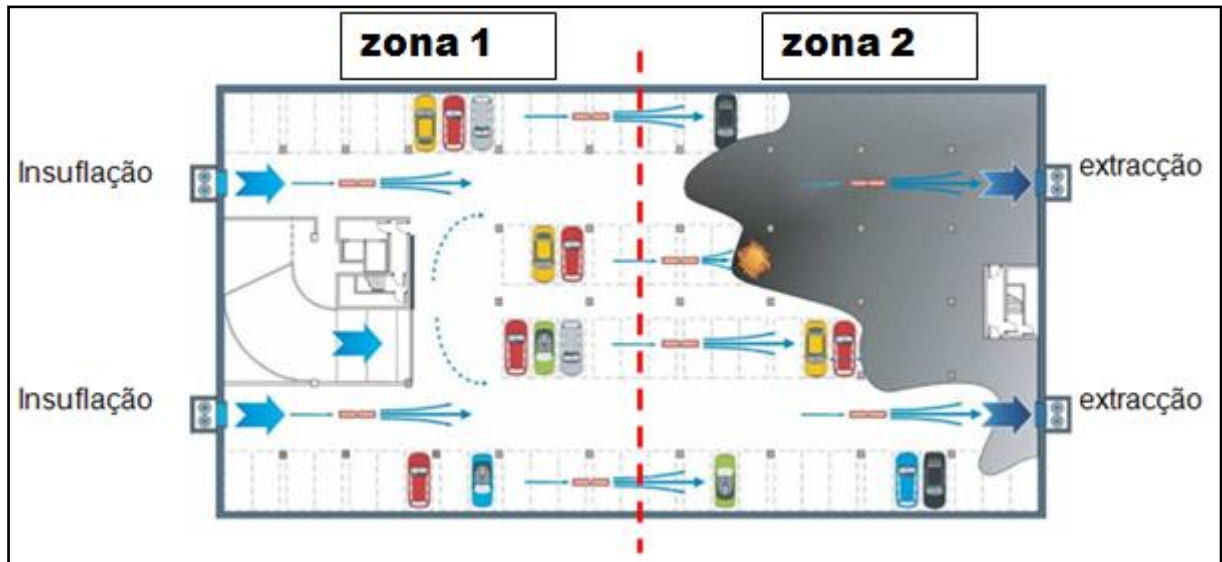
**Figura 2.3** - Extração de fumo proveniente de uma fonte de calor

Numa situação de incêndio no interior de um parque de estacionamento subterrâneo é necessário proceder a uma rápida confinação e extração dos gases quentes e tóxicos. A rápida confinação destes gases permite minimizar o impacto do escoamento do fumo gerado pelo incêndio, pelo menos durante o tempo necessário para assegurar a evacuação dos respectivos ocupantes.

Na lógica desta técnica, o parque de estacionamento é dividido em zonas virtuais (Reeves, 2006), acopladas a sistemas de ventilação reversíveis. Deste modo, obtém-se um controlo de fumo eficaz que limita a sua dispersão no parque de estacionamento.

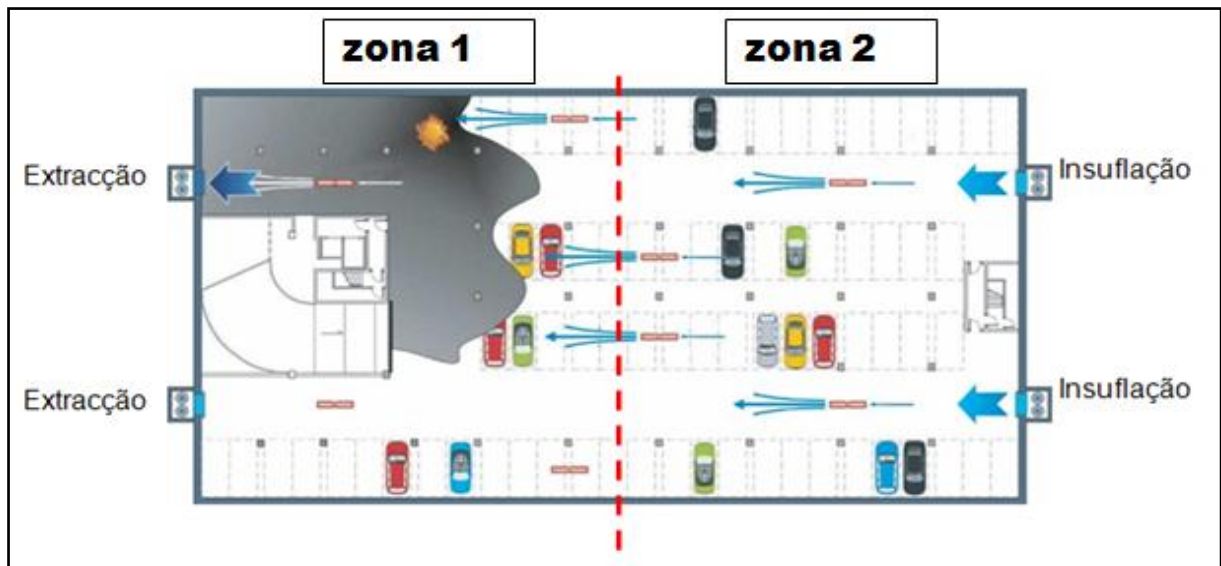
Nas figuras 2.4 e 2.5 está representado um modelo simples de um parque de estacionamento fechado. Este parque, devido às suas pequenas dimensões, é dividido em duas zonas virtuais: zona 1 e zona 2. A criação das zonas virtuais acopladas à reversibilidade do sistema de ventilação (ventiladores axiais e de impulso) permite um controlo eficaz dos gases quentes e tóxicos.

Se um incêndio ocorrer na zona 2 (figura 2.4), o sistema funciona de modo a evacuar os gases quentes e tóxicos para o local mais perto das grelhas associadas aos ventiladores de extracção. O sentido de funcionamento pode ser definido como sentido direito.



**Figura 2.4** - Incêndio na zona virtual: zona 2

No caso de o incêndio ocorrer na zona 1 (figura 2.5), o sistema de ventilação, pode ser reversível, funciona no sentido inverso. A extracção é, assim, realizada perto do foco de incêndio do parque. Deste modo é possível uma rápida confinação dos gases quentes e tóxicos e posterior evacuação para o exterior.



**Figura 2.5** - Incêndio na zona virtual: zona 1

A extracção de fumo, em caso de incêndio de algum dos veículos automóveis, no interior de um parque de estacionamento, pretende evitar que as pessoas presentes no local respirem os fumos tóxicos gerados e percam a visibilidade necessária para alcançar as vias de escape. Devido à sua temperatura, os fumos acumulam-se na parte alta do recinto e deveriam ser evacuados antes de se encontrarem em quantidades excessivas. Os ventiladores de impulso empurram os fumos na direcção das grelhas de extracção e permitem assim, aos bombeiros chegar facilmente ao local do fogo.

Nos capítulos seguintes vão ser analisados os comportamentos dinâmicos no interior de recintos fechados. Os resultados são obtidos através de várias simulações numéricas, nas quais são alteradas várias características dos ventiladores de impulso assim como do meio envolvente. As simulações numéricas realizadas permitem analisar o escoamento de um ventilador de impulso isolado, assim como o de um conjunto de ventiladores.



### 3. Modelação numérica

A resolução directa das equações de Navier-Stokes, que regem o movimento dos fluidos viscosos, é um problema complexo do domínio da Mecânica dos Fluidos. A resolução directa das equações de Navier-Stokes é impossível nas aplicações de engenharia, pois envolvem números de Reynolds muito elevados e consequentemente escoamentos turbulentos (Ferziger and Peric, 1999).

Para a simulação destes escoamentos complexos, recorre-se à utilização de programas numéricos, que permitem a resolução das equações de Navier-Stokes. No entanto, com os meios computacionais actuais, a resolução directa destas equações para problemas de engenharia não é possível.

A forma corrente de ultrapassar esta dificuldade consiste em escrever as equações de Navier-Stokes considerando a velocidade como a soma do seu valor médio com a sua flutuação, variável no tempo e no espaço. Assim se obtêm as equações de Navier-Stokes-Reynolds, envolvendo apenas grandezas médias e as tensões de Reynolds, conhecidas literalmente como RANS (*Reynolds-averaged Navier-Stokes*). A contribuição das flutuações de velocidade, aparece através das tensões de Reynolds usando a hipótese de Boussinesq, o que conduz à adopção de uma viscosidade turbulenta. Ao sistema de equações de continuidade e de quantidade de movimento do fluido é adicionado um modelo de turbulência.

As equações RANS são utilizadas na maior parte dos projectos e optimização de engenharia, sendo necessário recorrer a modelos de turbulência existentes ( $k-\epsilon$ ,  $k-w$ , Spalart-Allmaras, entre outros modelos), a fim de permitir a resolução das equações (FLUENT 6.2 User's Guide, 2005).

No presente estudo, adoptou-se um modelo de turbulência com duas equações, onde a produção de turbulência é relacionada com os gradientes da velocidade média do escoamento. Assim sendo, a produção da turbulência fica apenas activa nas zonas onde os gradientes da velocidade são elevados.

### 3.1 Equações de Navier Stokes

As equações de Navier-Stokes descrevem a dinâmica de fluidos, sejam estes fluidos líquidos ou gases. Estas equações são diferenciais, e estabelecem uma relação entre taxas de variação das variáveis (por exemplo, velocidade e pressão).

Equações de Navier-Stokes para fluido incompressível:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho u_i u_j = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3.1)$$

Com o tensor de viscosidade:

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.2)$$

onde:

- $\rho$  designa a massa volúmica do fluido ( $kg/m^3$ ).
- $u_i (i = 1,2,3)$  designa as componentes da velocidade ( $m/s$ ).
- $x_i (i = 1,2,3)$  designa as coordenadas cartesianas ( $m$ ), com  $x_3$  eixo vertical.
- $p$  designa a pressão ( $Pa$ ).
- $t$  designa o tempo ( $s$ ).
- $\mu$  designa a viscosidade do fluido ( $Pa \cdot s$ ).

Considerando o escoamento incompressível, obtém-se a seguinte equação de continuidade:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.3)$$

### 3.2 Reynolds Averaged Navier-Stokes; RANS equations

Num escoamento, qualquer grandeza  $\phi$  (velocidade, pressão, energia) pode ser escrita como a soma de uma média e de uma flutuação.

$$\phi(x_i, t) = \bar{\phi}(x_i) + \phi'(x_i, t) \quad (3.4)$$

onde;

$$\bar{\phi}(x_i) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \phi(x_i, t) dt \quad (3.5)$$

Nesta relação,  $t$  é a variável de tempo, e  $T$  é o intervalo onde se calcula a média. Este intervalo de tempo deve ser suficientemente grande, comparativamente com a escala de tempo típica das flutuações. No entanto, o interesse reside no limite  $T \rightarrow \infty$ : se  $T$  tiver um intervalo suficientemente grande, dá origem a que a média  $\bar{\phi}$  não dependa do tempo.

Substituindo as equações instantâneas (3.1) e (3.2) e aplicando a média temporal às equações da continuidade e da quantidade de movimento (equações de Navier-Stokes), obtêm-se em coordenadas cartesianas, para um fluido incompressível, as equações seguintes:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \rho u_i = 0 \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (3.7)$$

As equações (3.6) e (3.7) são designadas por equações de Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) e têm a mesma forma geral das equações instantâneas de Navier-Stokes, mas com as variáveis representadas em valor médio. Devido a esta operação surgem novos termos representativos do efeito da turbulência: O tensor de Reynolds,  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ . De modo a ser possível descrever este tensor é necessário recorrer a modelos de turbulência, tornando assim possível fechar o sistema de equações. Boussinesq propôs a seguinte aproximação:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k \quad (3.8)$$

onde,

- $\mu_t$  designa a viscosidade turbulenta,
- $k$  a energia cinética turbulenta ( $J/Kg$ )

Esta aproximação é utilizada no modelo de turbulência Spalart-Allmaras, e nos modelos com duas equações  $K$ - $\epsilon$  e  $K$ - $\omega$  entre outros.

### 3.2.1 Modelos de turbulência com duas equações

Os escoamentos turbulentos são caracterizados por flutuações de velocidades. Estas flutuações podem ser de escalas e frequências distintas, tornando a simulação computacional dos escoamentos mais exigente. De modo a tornar a simulação de escoamentos turbulentos menos complexa, são introduzidos modelos de turbulência, em conjunto com as equações  $RANS$ . De entre os vários modelos existentes, o modelo com duas equações  $K$ - $\epsilon$  padrão é baseado nas equações de transporte de energia cinética turbulenta,  $K$ , e da sua taxa de dissipação,  $\epsilon$ . Este modelo assume que o escoamento é completamente turbulento e que os efeitos da viscosidade são desprezáveis face à difusão turbulenta.

A energia cinética turbulenta,  $k$ , e a taxa de dissipação,  $\epsilon$ , para fluido incompressível, são obtidas a partir das seguintes equações de transporte:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho k + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho k u_i = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (3.9)$$

e

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho \epsilon u_i = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3.10)$$



onde,

- $G_k$  representa a geração de energia cinética turbulenta devido aos gradientes de velocidade média.
- $G_b$  representa a geração de energia cinética turbulenta devido à flutuação.
- $Y_M$  representa a geração de energia devido à compressão flutuante nos fluxos turbulentos compressíveis.
- $C_{1\varepsilon}$  e  $C_{2\varepsilon}$  são constantes
- $\sigma_k$  e  $\sigma_\varepsilon$  representamos números de Prandtl para  $k$  e  $\varepsilon$  respectivamente.

Neste modelo, a viscosidade turbulenta,  $\mu_t$ , é calculada, combinando  $k$  e  $\varepsilon$ , pela seguinte expressão:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.11)$$

As constantes do modelo  $k - \varepsilon$ , têm por defeito, os seguintes valores:

$$C_\mu = 0.09 \quad C_{\varepsilon 1} = 1.44 \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

### 3.3 Esquema Numérico Utilizado

Para resolver o conjunto de equações precedentes, é necessário transformar as equações contínuas em equações discretas.

Para a discretização no espaço, o Fluent tem alguns esquemas de discretização disponíveis: esquema de primeira ordem, UDS, o esquema de segunda ordem, Second Order Upwind e por fim o esquema de terceira ordem, QUICK. O esquema utilizado é o esquema QUICK, que permite uma melhor precisão de resultados em relação aos esquemas anteriores.

Para a obtenção de soluções é necessário escolher entre três diferentes algoritmos de acoplamento entre a velocidade e pressão (Pressure-Velocity Coupling). Os algoritmos são o SIMPLE, que utiliza a relação velocidade pressão e um factor de correcção de modo a obter um campo de pressões; o SIMPLEC (SIMPLE-Consistent), tem por base o algoritmo anterior mas com diferenças ao nível do factor de correcção, por fim temos o algoritmo PISO (Pressure-Implicit With Splitting of Operators), que utiliza o relacionamento entre pressão e velocidade e dois factores de correcção (Neighbor Correction e Skewness Correction), o que faz com que supere algumas limitações dos algoritmos anteriores, mas aumenta o tempo de cálculo. Neste estudo, o acoplamento entre a velocidade e pressão escolhido foi o SIMPLE.

Para escoamentos isotérmicos, calibração do ventilador de impulso, o fluido é incompressível e utiliza-se o esquema Pressure Standart, esquema de segunda ordem. O esquema de diferenças centradas é classicamente utilizado para o termo difusivo.

Nos capítulos referentes ao parque simplificado e parque real, onde é modelado um incêndio, utiliza-se a equação de energia. O incêndio é modelado através de uma fonte térmica fluida onde é imposta a energia libertada ( $\text{MW}/\text{m}^3$ ). A massa volúmica é determinada utilizando a equação dos gases ideais.

Nestas simulações numéricas não são considerados modelos de radiação, é uma simplificação relativamente clássica neste tipo de aplicação. É assim considerada a parte convectiva da energia, já que a parte associada a radiação não está modelada.

O modelo de turbulência utilizado é o  $K-\varepsilon$  standard modificado que toma em conta a geração de energia cinética turbulenta devido à impulsão.

.

### 3.4 Malha

A construção da malha é uma arte onde a experiência é relevante. Apenas com uma construção cuidada e bem planeada é possível obter a melhor solução, o que se traduz por uma melhor convergência dos resíduos.

Existem vários factores que ditam a validação da malha e o seu consequente sucesso, sendo os de maior importância, além de um adequado número de elementos para o caso a estudar, o tamanho dos elementos e os rácios entre comprimento e largura.

Com estes factores como guias para a construção da malha pretende-se não só a qualidade de elementos da malha como também evitar sobrecarregar os recursos para a resolução. Actualmente pode-se optar por dois métodos de malha distintos, malha estruturada e malha não estruturada.

O método de malha estruturada utiliza um padrão de elementos regular repetido. Para o caso 2D utiliza elementos quadriláteros e para o caso 3D utiliza elementos hexaedros. A utilização de malha estruturada apresenta uma vantagem em relação a outros métodos, permitindo um controlo na sua construção e no nível de precisão dos esquemas numéricos.

O método de malha não estruturada utiliza uma compilação de elementos distintos de modo a modelar o domínio físico, não sendo possível estabelecer um padrão como no método anterior. A escolha deste método, origina a existência de elementos (tetraédricos, hexaedros e prismáticos) no domínio computacional, sendo assim possível gerar malhas em torno de geometrias complexas. Finalizada a geração de malha no corpo, é possível indicar as condições limites (condições de velocidade na fronteira, condições de temperatura, de pressão etc.)

Nesta dissertação, o programa seleccionado para a construção do domínio de cálculo e da malha é o software GAMBIT (versão 2.2.30).

## 4. Calibração do Ventilador de Impulso

### 4.1 Introdução

A modelação numérica da ventilação de ar num parque de estacionamento passa necessariamente pela modelação numérica do ventilador de impulso. Do ponto de vista de engenharia, não há necessidade de modelar o escoamento dentro do ventilador de impulso (pás, etc.) mas apenas determinar com um modelo simples, mas suficientemente realista e que se pode aplicar em casos concretos, o escoamento provido pelo ventilador de impulso. É o objectivo deste trabalho.

As simulações numéricas foram efectuadas para um jacto livre, turbulento e isotérmico, tendo como objectivo verificar e quantificar a existência de velocidade tangencial imposta por parte do ventilador de impulso. A possibilidade de verificar e calibrar a existência de velocidade tangencial (swirl) tem como base a comparação dos resultados numéricos obtidos através das simulações numéricas efectuadas, com resultados obtidos experimentalmente (France-Air, 2007) (LNEC, 2009).

Com a componente tangencial aproximadamente determinada, é analisada a influência do refinamento da malha e do pé direito no desenvolvimento do escoamento provido pelo modelo numérico do ventilador de impulso. Os resultados são comparados com os dados experimentais.

### 4.2 Formulação do problema

Normalmente, os ventiladores de impulso são constituídos por uma caixa de geometria variável (cilíndrica, rectangular), um ventilador axial colocado no interior e a meio do corpo cilíndrico e um motor eléctrico (figura 4.1).



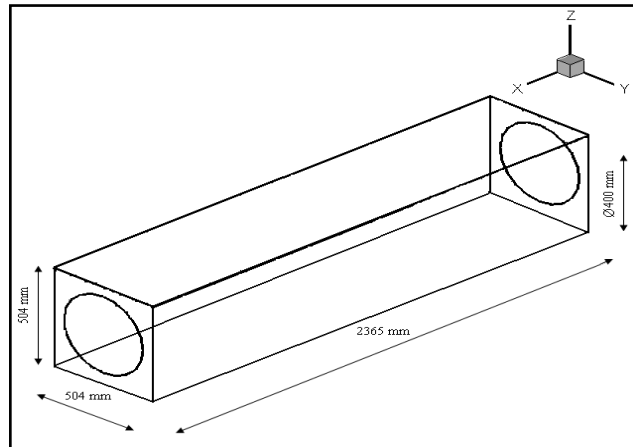
**Figura 4.1** - Ventilador de impulso: num parque de estacionamento

O modelo de ventilador de impulso (figura 4.2) escolhido para as simulações numéricas é um modelo comercial da France-Air, AXALU-TR 40 RC, com características específicas que foram contabilizadas e mantidas para as respectivas simulações.

O modelo numérico de ventilador de impulso tem a configuração representada na figura 4.2. É constituído por duas faces quadradas onde se encontra a secção circular útil do ventilador de impulso e uma caixa rectangular.

São consideradas as seguintes simplificações:

- Representação da parte exterior do ventilador de impulso: a parte interior não é analisada (pás e conduta interior).
- Caixa exterior rectangular, que facilita a construção da malha.
- Secção circular a cada extremidade onde são aplicadas as condições limite da velocidade: uma de insuflação e outra de aspiração com as respectivas condições limite.



**Figura 4.2** - Dimensões do modelo numérico de ventilador de impulso

O ventilador de impulso tem duas secções circulares na sua extremidade, uma de aspiração e outra de insuflação, conforme o sentido do escoamento provido pelo ventilador anterior. Estes ventiladores têm a característica de serem reversíveis na sua totalidade e permitir assim insuflar numa direcção ou na direcção contrária.

O ventilador axial colocado no interior do corpo do ventilador de impulso físico origina um escoamento com velocidade axial, de fácil determinação devido às características fornecidas pelo fabricante:

- Caudal,  $2,3 \text{ m}^3/\text{s}$
- Diâmetro das secções de aspiração/insuflação,  $\varnothing = 400 \text{ mm}$

Velocidade axial:

$$Q = v \times A \Leftrightarrow v = \frac{Q}{A} = \frac{2,3}{\pi \times 0,2^2} = 18,3 \text{ m/s} \quad (4.1)$$

A velocidade axial é imposta na face de aspiração assim como na face de insuflação, para respeitar o caudal aspirado e induzido pelo ventilador.

O escoamento induzido pelo ventilador de impulso pode apresentar uma topologia rotativa. É o caso dos ventiladores de impulso da gama AXALU-TR da France Air (LNEC, 2009). O

escoamento rotativo observado tem origem no próprio ventilador, o que implica que na secção circular de insuflação do ventilador de impulso, existe uma componente rotativa no escoamento, ou seja, uma componente tangencial da velocidade. Ao nível do modelo numérico de ventilador, a componente tangencial da velocidade é imposta na secção de insuflação através de um ficheiro UDF (User Define Function), escrito em linguagem C e funções próprias do FLUENT. Este ficheiro permite impor condições limites específicas. No entanto é necessário quantificar a velocidade tangencial.

Para as simulações numéricas é adoptado um perfil simples e linear da variação da componente tangencial da velocidade com a distância ao centro da face. O perfil da componente tangencial da velocidade assume a seguinte relação:

$$V_t(r) = v_{tg} \times \frac{r}{R} \quad (4.2)$$

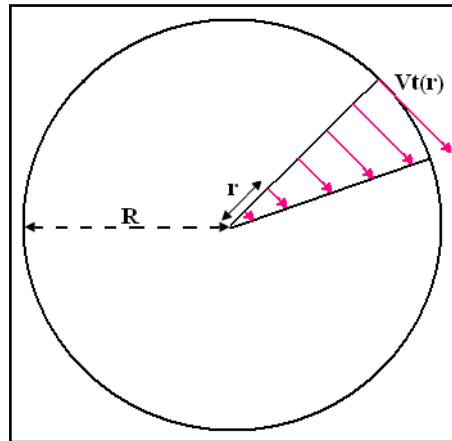
Onde,

- $R$  é o raio da face circular do modelo numérico do ventilador de impulso,
- $r$  é a distância ao centro da face,
- $V_t$  é a componente tangencial da velocidade.
- $V_{tg}$  é a componente tangencial máxima que se verifica para  $r=R$ .

$$r = R \Rightarrow V_t(r) = V_{tg} \quad (4.3)$$

A componente tangencial da velocidade está assim relacionada com a distância do centro da face de insuflação até à sua extremidade (figura 4.3). Assim, a componente tangencial da velocidade é máxima na extremidade da face de insuflação do modelo numérico do ventilador de impulso.





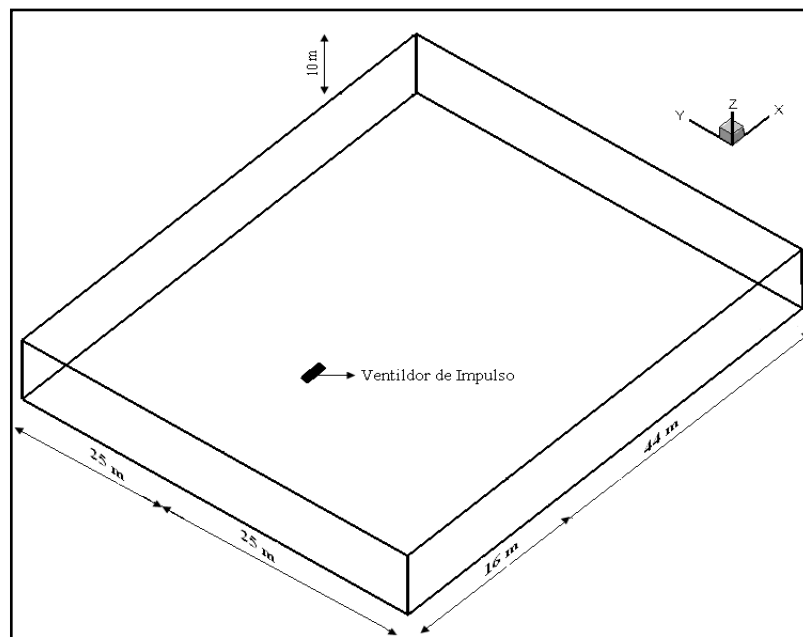
**Figura 4.3** - Perfil da variação da componente tangencial da velocidade

O escoamento provido pelo modelo numérico do ventilador de impulso é analisado comparando o seu campo de velocidade, obtido no domínio computacional, com o campo de velocidade obtido através de medições experimentais. Deste modo é possível calibrar o ventilador de impulso e estabelecer uma relação entre a velocidade axial e a velocidade tangencial.

#### 4.2.1 Domínio computacional e sua discretização

A dimensão e discretização do domínio de cálculo são factores importantes para a modelação numérica de casos tridimensionais. Na definição do domínio computacional, as fronteiras devem situar-se suficientemente afastadas do ventilador de impulso, de forma a minimizar a eventual influência destas.

A geometria simulada neste estudo (figura 4.4) é constituída por um espaço de 60m de comprimento (longitudinalmente ao eixo do ventilador), por 50m de largura (perpendicular ao eixo do ventilador) e 2,5m, ou 10m de altura. O ventilador encontra-se acostado ao tecto, com o correspondente eixo distanciado perpendicularmente de 25m das paredes laterais. A face de insuflação do modelo numérico do ventilador de impulso encontra-se a 46m do fim do domínio de cálculo. É de relembrar que a simulação diz respeito a um ventilador de 54N de impulso, tendo este uma secção circular de 200mm de raio. Assim, na face de aspiração foi imposta uma velocidade axial de 18,3m/s, na face de insuflação foi também imposta uma velocidade axial de 18,3m/s, conservação do caudal, e uma velocidade tangencial a definir.



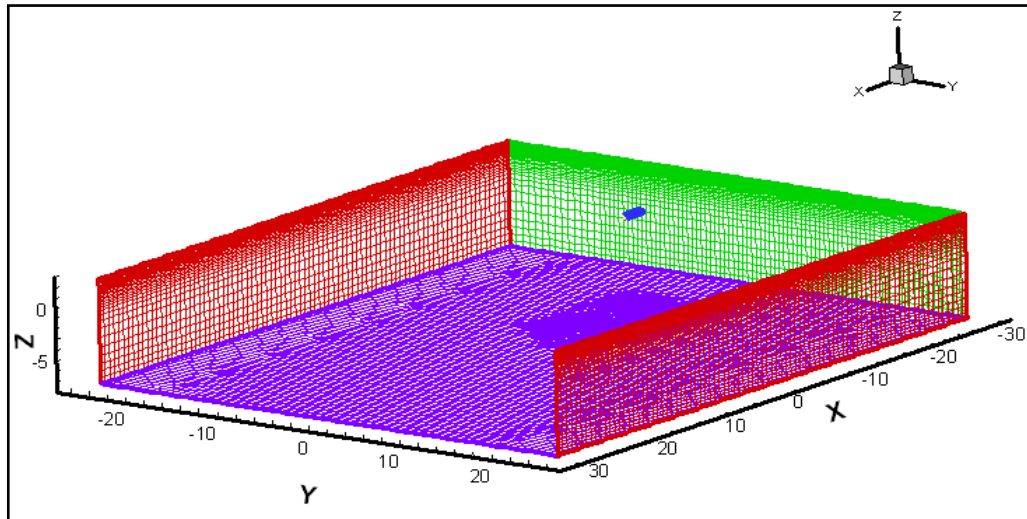
**Figura 4.4** - Domínio computacional: para a calibração do ventilador de impulso

As condições de fronteira para este estudo são as seguintes:

- As fronteiras laterais (paralelas ao eixo do ventilador de impulso) são simuladas por planos de simetria.
- A fronteira situada a montante assim como a fronteira a jusante do ventilador constituem uma abertura livre.
- Os planos, inferior e superior (respectivamente  $z=0\text{m}$ ,  $z=2,5\text{m}$  ou  $z=10\text{m}$ ) representam o chão e o tecto, pelo qual é atribuído uma condição de fronteira de parede (de aderência).

No processo de construção da malha em torno do ventilador de impulso é importante aplicar um refinamento progressivo dos elementos, desde as paredes do corpo até as fronteiras do domínio computacional e utilizar o menor número de elementos possível, sem colocar em causa a validade resultados (figura 4.5).

Este segundo aspecto tem de ser tomado em reflexão, uma vez que em simulações numéricas tridimensionais o número de elementos rapidamente ascende a valores elevados, o que traduz um elevado esforço computacional.



**Figura 4.5** - Malha do domínio computacional: pé direito de 10m

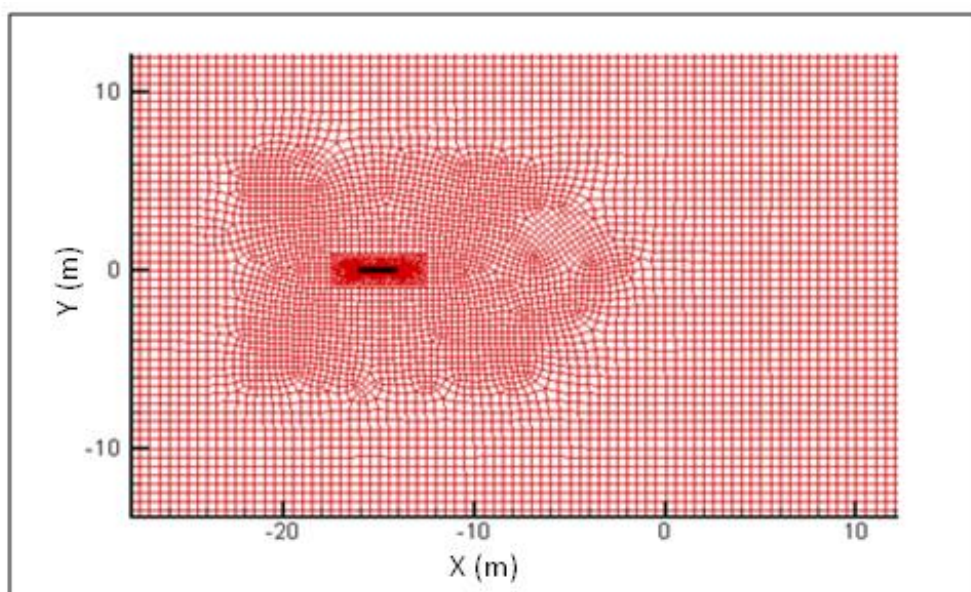
Para o presente estudo, foram utilizadas duas geometrias diferentes, tendo como principal objectivo analisar a influência da variação do pé direito no escoamento ( $z=2,5\text{m}$  e  $z=10\text{m}$ ). No sentido de apreciar a independência da malha, foi simulada a mesma geometria para duas malhas distintas, uma malha refinada e uma malha grosseira.

A seguinte tabela 4.1 apresenta o número de elementos das malhas:

|                 | $Z=2,5\text{m}$ | $Z=10\text{m}$ |
|-----------------|-----------------|----------------|
| Malha refinada  | 585.627         | 818.475        |
| Malha grosseira | 222.786         | 394.594        |

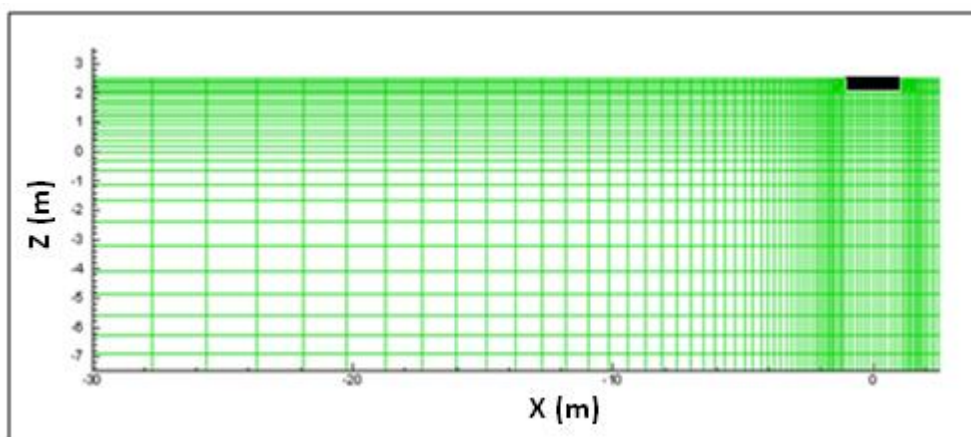
**Tabela 4.1** - Características das malhas utilizadas

Para ambas as malhas, a discretização junto das faces de aspiração/insuflação é onde se localiza o maior número de elementos, deste modo possibilita ajustar-se à geometria do ventilador, assim como melhorar a modelação da fase inicial do jacto (figura 4.6). Esta discretização é mantida, mesmo quando é alterada a geometria do domínio computacional, passando o pé direito de 2,5m para 10m.



**Figura 4.6** -Discretização horizontal: plano  $z=2,25\text{m}$

Como se pretende analisar os fenómenos dinâmicos do modelo de ventilador de impulso, é necessário proceder a uma discretização cuidada na direcção vertical e perto do tecto (figura 4.7) onde é colocado o ventilador de impulso. A proximidade entre o tecto e o ventilador de impulso induz alterações no desenvolvimento do escoamento, como será representado mais à frente.



**Figura 4.7** - Discretização vertical: plano  $y=0\text{m}$

### 4.2.2 Parâmetros da modelação numérica

Para ser possível proceder às simulações numéricas do caso tridimensional, utilizou-se o código comercial FLUENT.

Na resolução do acoplamento entre a velocidade e a pressão utilizou-se o algoritmo SIMPLE. Os termos convectivos nas faces dos volumes de controlo são interpolados pelo esquema de terceira ordem QUICK, assim como os termos difusivos das equações.

Os valores padrão dos factores sub-relaxação são os seguintes: 0,3 para a pressão; 0,7 para o momento; 0,8 para a energia cinética de turbulência e dissipação turbulenta; e 1,0 para a viscosidade turbulenta modificada.

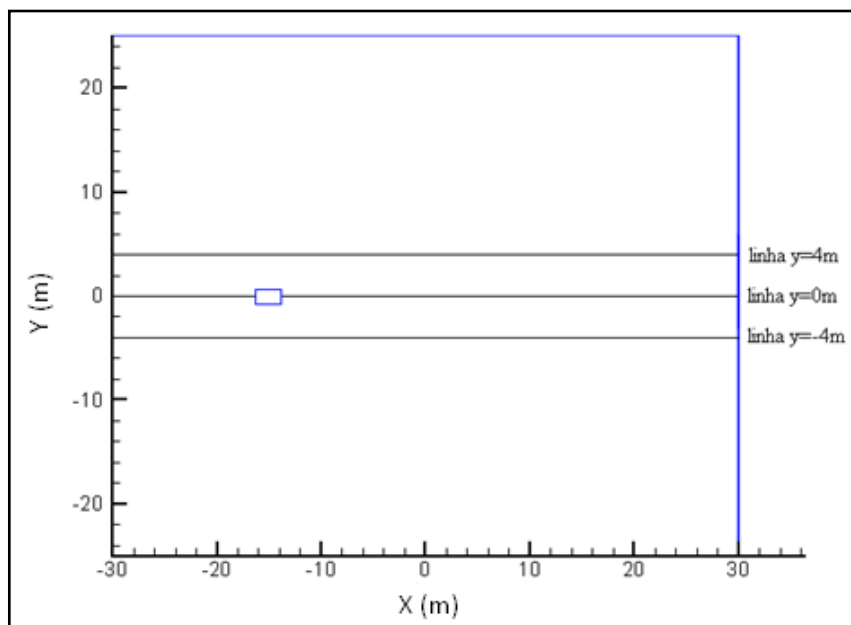
O modelo de turbulência seleccionado para as simulações realizadas é o modelo de duas equações  $k-\epsilon$ , que é um modelo simples e Standard. Considerou-se a não existência de turbulência na entrada do domínio computacional.

Considerou-se que as simulações atingiram a convergência durante o processo iterativo quando os resíduos estabilizaram, chegando aos patamares correspondentes dos resíduos mínimos para cada variável.

### 4.3 Resultados

As simulações numéricas realizadas pretendem modelar o escoamento desenvolvido por um modelo numérico de ventilador de impulso. Nas simulações, o ventilador localiza-se no tecto, com o seu eixo a uma distância de 0,25m do tecto. A distância entre o chão e o tecto é de 2,5m ou 10m. Para as primeiras simulações, foi utilizada uma altura de 10m e a malha utilizada é a malha fina. Esta escolha tem como objectivo que os resultados não sejam influenciados por uma distância reduzida entre o chão e o tecto, sendo semelhantes às condições dos ensaios experimentais.

Devido à interacção do escoamento com o tecto, foi estabelecido como plano de referência, o plano horizontal que passa pelo centro da face de insuflação do ventilador de impulso, ou seja, o plano horizontal que se situa a 0,25m do tecto. De modo a ser possível a comparação dos valores da velocidade  $U_x$  obtidos numericamente com os dados experimentais foram analisadas as velocidades  $U_x$  em vários locais. Estes locais (linhas longitudinais) estão distanciados paralelamente do eixo do modelo do ventilador de impulso (figura 4.8) e foram obtidos do plano de referência, que passa pelo centro da face de aspiração/ insuflação do modelo do ventilador de impulso.



**Figura 4.8** - Plano horizontal de referência e representação de algumas linhas para os perfis de velocidade

Os resultados obtidos através das simulações numéricas realizadas, têm como objectivo analisar a abertura do jacto. Para ser possível analisar esta abertura, foram analisadas as velocidades medidas em várias linhas paralelas ao eixo do ventilador de impulso. Os resultados obtidos são comparados com dados experimentais registados por duas fontes distintas, o LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) e a empresa France-Air que comercializa os ventiladores de impulso.

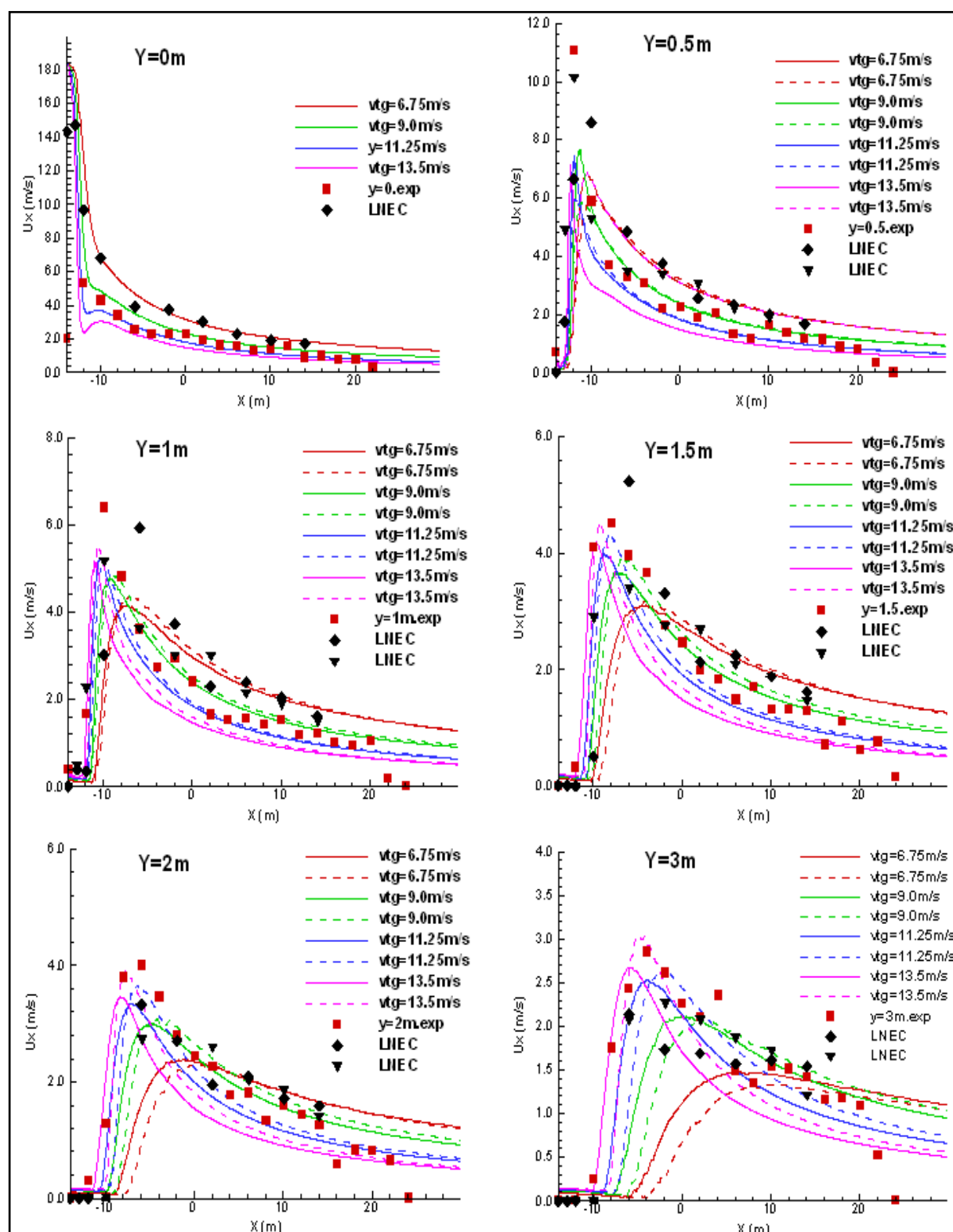
O objectivo das simulações realizadas é quantificar a velocidade tangencial imposta pelo ventilador de impulso. Com este intuito foram realizadas quatro simulações, nas quais foram impostas quatro velocidades tangenciais diferentes na face de insuflação. As velocidades tangenciais máximas impostas são as seguintes:

- Velocidade tangencial de 6,75m/s (sensivelmente 37% da velocidade axial)
- Velocidade tangencial de 9,0m/s (sensivelmente 50% da velocidade axial)
- Velocidade tangencial de 11,25m/s (sensivelmente 61% da velocidade axial)
- Velocidade tangencial de 13,5m/s (sensivelmente 74% da velocidade axial)

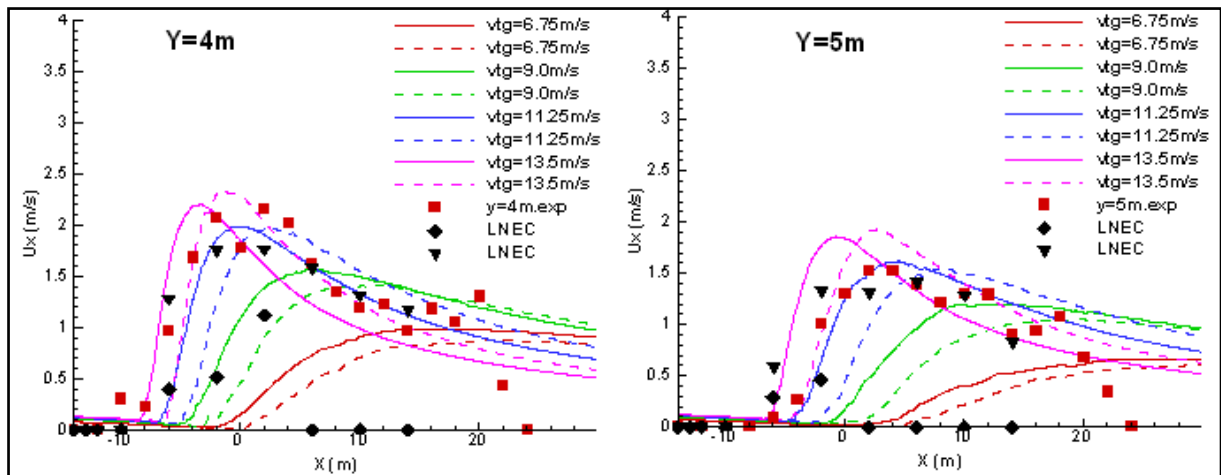
O escoamento é analisado na totalidade do domínio computacional, com uma atenção a jusante do ventilador de impulso, ou seja, da secção de insuflação até à respectiva fronteira de saída do domínio computacional.

Devido à análise dos dados experimentais fornecidos pela entidade, LNEC, observou-se que o escoamento provido pelo ventilador de impulso não é simétrico. Este facto não é possível constatar nos dados fornecidos pelo fabricante, France-Air, onde o registo dos dados foi apenas estabelecido numa direcção paralela ao eixo do ventilador.

A figura 4.9 apresenta a variação da componente  $U_x$  da velocidade obtida para as quatro velocidades tangenciais e a comparação com dados experimentais.







**Figura 4.9** - Perfis de velocidade  $U_x$ :  $vtg$ : 6,75m/s, 9,0m/s, 11,25m/s e 13,5m/s

Observa-se na figura 4.9 que, para zonas junto ao ventilador de impulso e à saída do mesmo ( $y=0m$ ,  $y=0,5m$  e  $y=1m$ ) os valores obtidos numericamente são inferiores aos valores experimentais. Para as velocidades tangenciais mais baixas, observa-se que atingem um valor de velocidade ( $U_x$ ) menor à saída do ventilador, comportamento que se altera ao longo do domínio computacional.

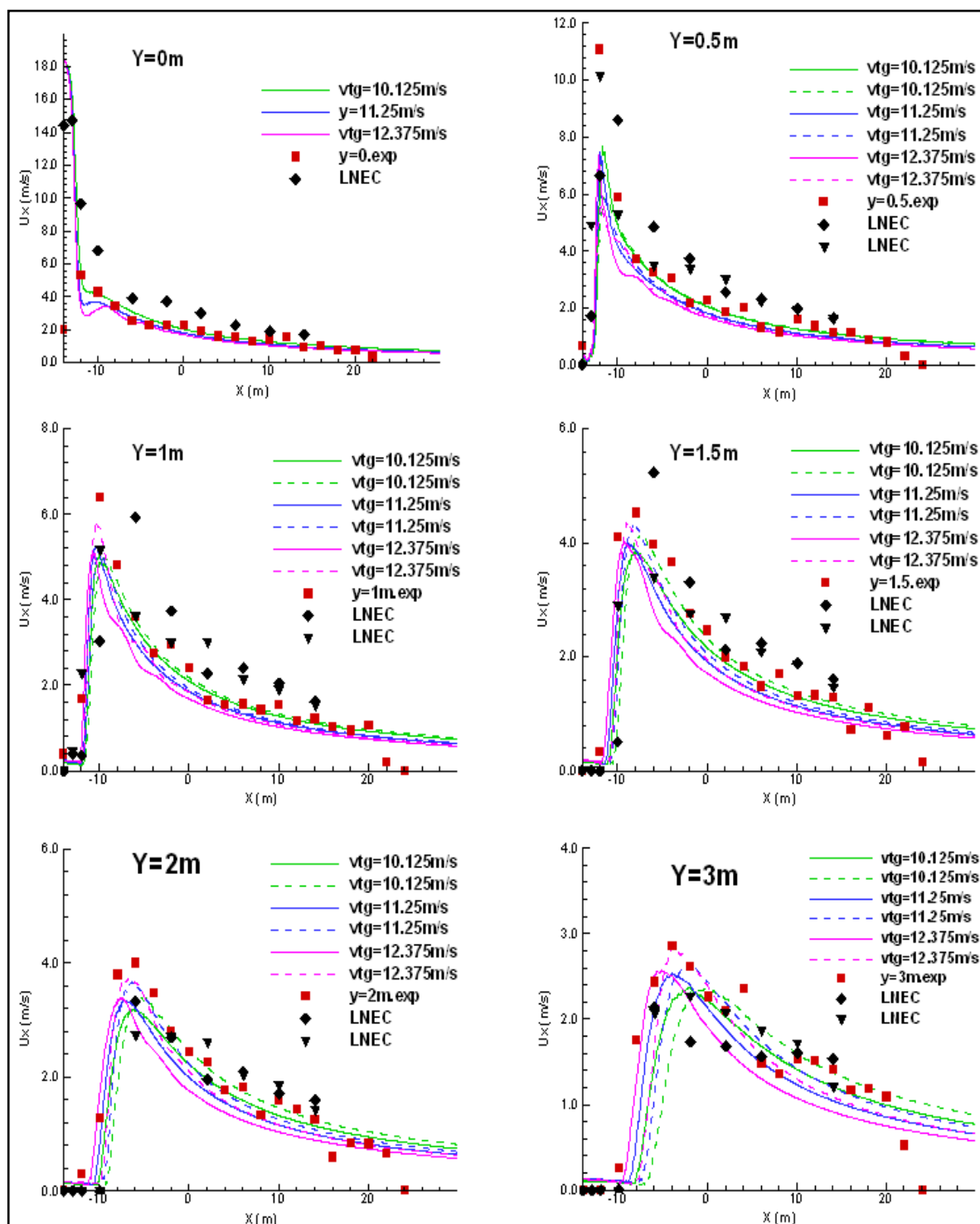
Para locais mais afastados do eixo do ventilador ( $y=3m$ ,  $y=4m$  e  $y=5m$ ), assiste-se a uma tendência de concordância entre os valores obtidos numericamente e os valores obtidos experimentalmente, para velocidades tangenciais elevadas.

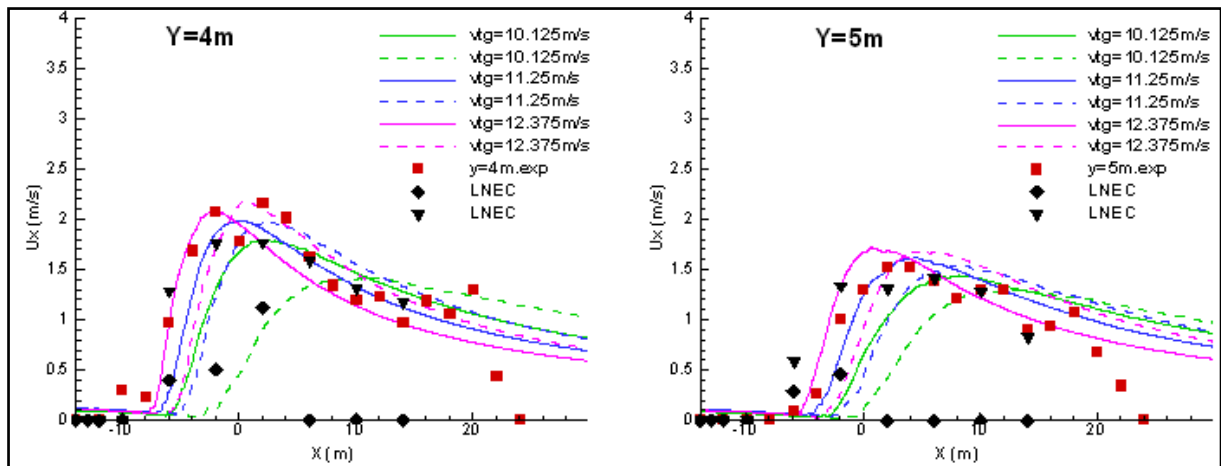
Com base nestes resultados foram realizadas novas simulações, com novos valores de velocidade tangencial. Os valores de velocidade tangencial escolhidos para as novas simulações foram os seguintes:

- Velocidade tangencial de 10,125m/s,
- Velocidade tangencial de 11,25m/s,
- Velocidade tangencial de 12,375m/s,

Para as simulações efectuadas foram mantidos os mesmos requisitos impostos para as simulações numéricas realizadas anteriormente.

Na figura 4.10 são apresentados os perfis de velocidade para os três valores referidos anteriormente.





**Figura 4.10** - Perfis de velocidade  $U_x$ :  $v_{tg}$ : 10,125m/s, 11,25m/s e 12,375m/s

Para a situação de análise junto ao ventilador de impulso ( $y=0,5m$  e  $y=1m$ ), os resultados obtidos numericamente para  $U_x$ , são inferiores aos resultados obtidos experimentalmente.

Para  $y=2m$  e  $y=3m$ , os valores obtidos numericamente avizinham-se dos resultados obtidos experimentalmente. Esta correspondência fica mais visível para valores de velocidade tangencial inferiores ( $v_{tg}=10,125m/s$  e  $v_{tg}=11,25m/s$ ).

Resta a análise para os locais mais afastados do ventilador, onde é mais visível a abertura do jacto proporcionado pelo ventilador. Para estes locais ( $y=4m$ ,  $y=5m$ ) observa-se que os resultados numéricos estão concordantes com os resultados experimentais. Os dados experimentais encontram-se entre as velocidades tangenciais que foram alvo das simulações numéricas.

Deste modo conclui-se que o escoamento originado pelo ventilador tem uma componente rotacional que não é desprezável e que deve ser contabilizada. Pelas simulações efectuadas e para o caso em estudo, a velocidade tangencial de 11,25m/s é tomada como valor de referência, sendo este o valor utilizado nas simulações seguintes, o que corresponde a um valor aproximado de 60% da velocidade axial.

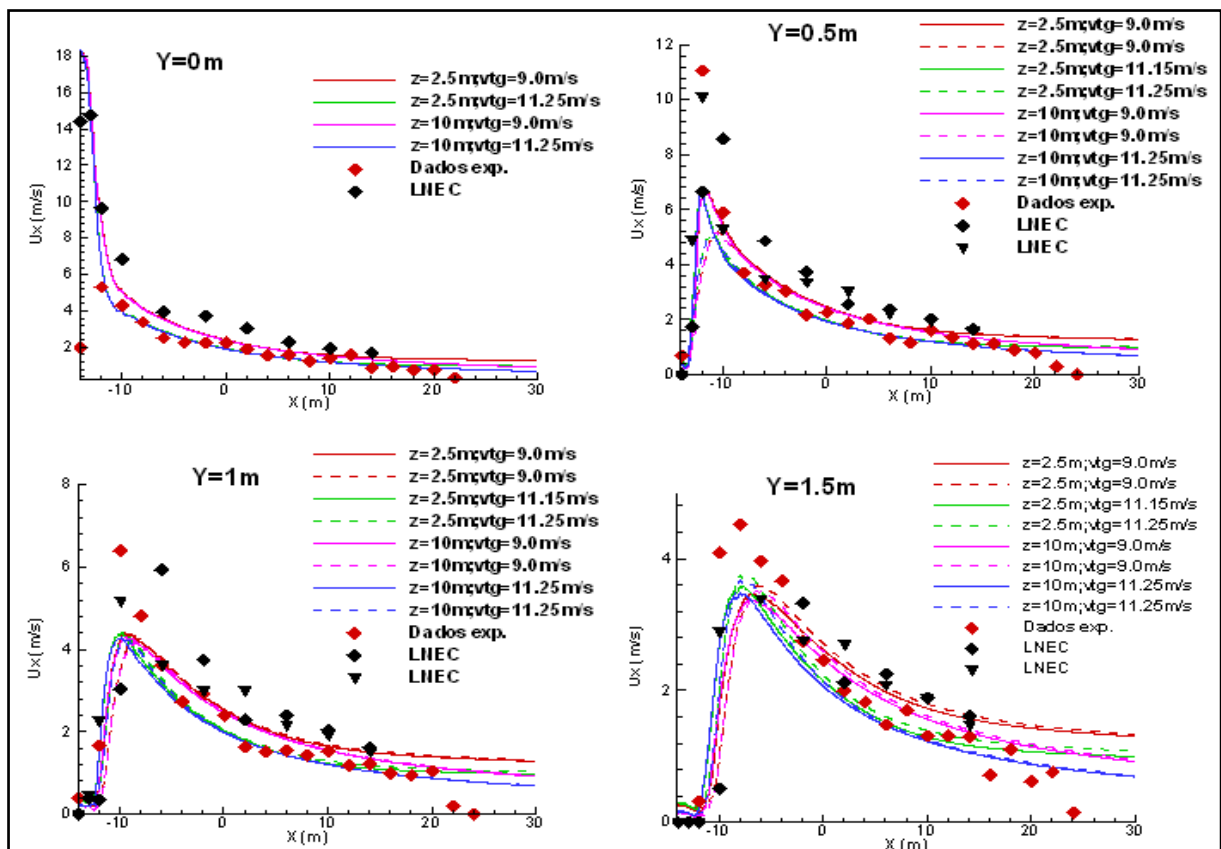
### 4.3.1 Influência do pé direito no escoamento

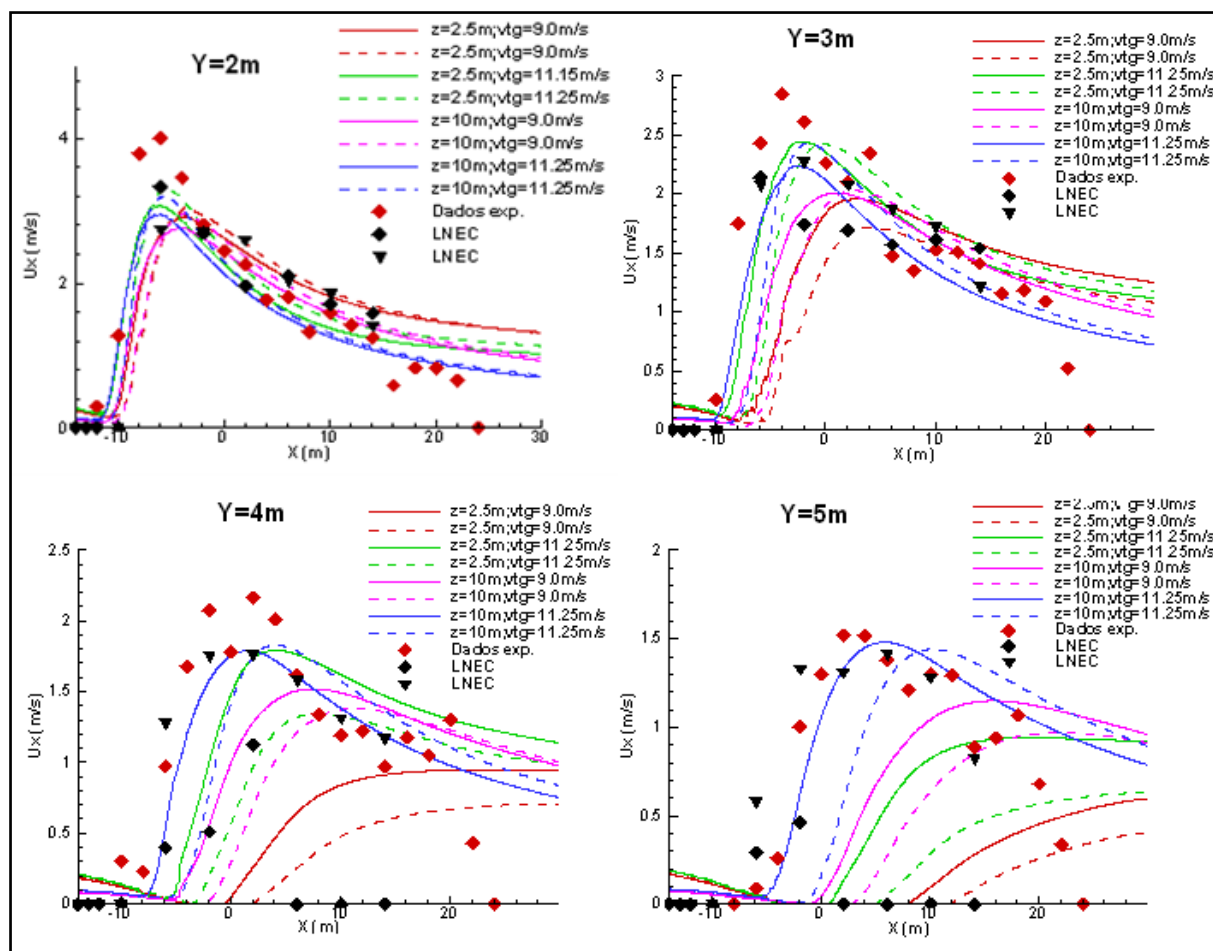
O estudo anterior permitiu determinar a velocidade tangencial na saída do ventilador de impulso, comparando com dados experimentais. Nesta parte, as simulações numéricas são realizadas para verificar a influência do pé direito no escoamento induzido pelo ventilador.

As simulações numéricas são realizadas para um pé direito de 2,5m. A malha utilizada respeita a mesma discretização vertical da malha fina para o pé direito de 10m. Pretende-se deste modo que a malha não seja um factor relevante na análise dos resultados.

As simulações numéricas foram realizadas utilizando duas velocidades tangenciais, a de referência (11,25m/s) e uma ligeiramente inferior (9,0m/s). Os resultados obtidos são também comparados com os resultados experimentais.

Na figura 4.11 apresenta-se os perfis de velocidade no plano horizontal do ventilador de impulso, comparando os resultados numéricos obtidos para o pé direito de 2,5m e 10m com os resultados experimentais.





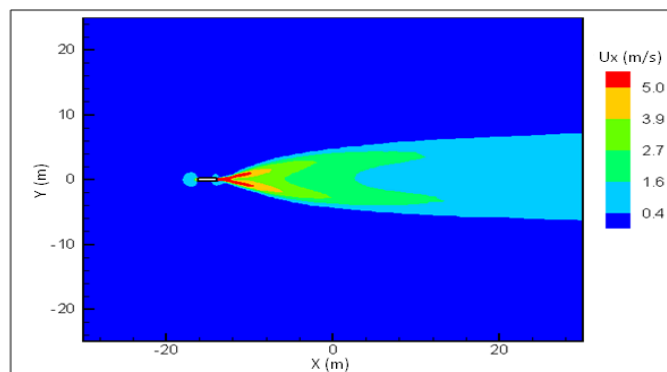
**Figura 4.11** - Perfis da componente,  $U_x$ , da velocidade: influência do pé direito (2,5m e 10m)

Através da análise gráfica, verifica-se que para locais junto do ventilador de impulso ( $y=0\text{m}$ ,  $y=0,5\text{m}$  e  $y=1\text{m}$ ), não se regista alteração do escoamento com a variação do pé direito. Verifica-se que a velocidade tangencial ( $9,0\text{m/s}$ ) mantém uma velocidade superior no domínio computacional comparativamente à velocidade tangencial ( $11,25\text{m/s}$ ), mesmo assim, ambas inferiores ao registado experimentalmente.

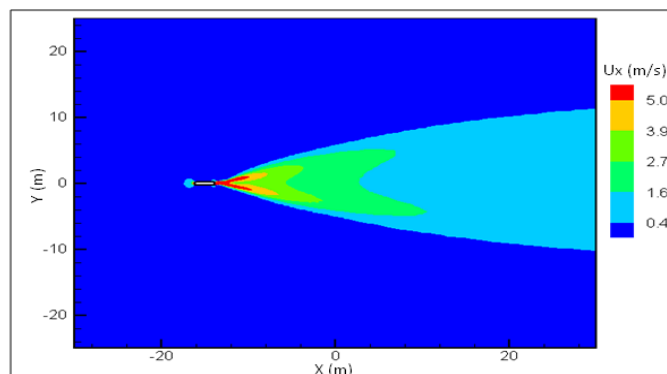
Para locais afastados do ventilador ( $y=3\text{m}$  e  $y=4\text{m}$ ), verifica-se uma ligeira influência por parte do pé direito nos resultados obtidos. O valor máximo da velocidade  $U_x$ , atinge-se num local situado um pouco mais a jusante para o pé direito  $z=2,5\text{m}$  do que para o pé direito  $z=10\text{m}$ . O pé direito de  $10\text{m}$  induz uma diminuição da velocidade  $U_x$  ao longo do domínio computacional, em relação ao observado para o pé direito de  $2,5\text{m}$ .

Na periferia do escoamento ( $y=5\text{m}$ ), verifica-se uma variação da velocidade  $U_x$  mais acentuada e influenciada pela variação do pé direito. Para o pé direito de  $10\text{m}$ , atinge-se velocidades superiores do que no caso do pé direito de  $2,5\text{m}$ .

As figuras 4.12 e 4.13 permitem visualizar a influência do pé direito no escoamento. A análise é efectuada para a componente horizontal da velocidade num plano horizontal que passa pelo centro da face de insuflação, a  $0,25\text{m}$  do tecto. A análise contempla as duas geometrias de referência,  $z=2,5\text{m}$  e  $z=10\text{m}$  e a velocidade tangencial de  $11,25\text{m/s}$ .



**Figura 4.12** - Componente  $U_x$  da velocidade no plano horizontal que passa pelo centro do ventilador de impulso para  $v_{tg}=11,25\text{m/s}$  e  $z=2,5\text{m}$



**Figura 4.13** - Componente  $U_x$  da velocidade no plano horizontal que passa pelo centro do ventilador de impulso, para  $v_{tg}=11,25\text{m/s}$  e  $z=10\text{m}$

A análise permite concluir que a variação no pé direito é mais notória para locais afastados do eixo do ventilador (distância perpendicular ao eixo do ventilador). Para o pé direito de  $2,5\text{m}$  a componente  $U_x$  da velocidade não verifica um decréscimo no seu valor como para o pé

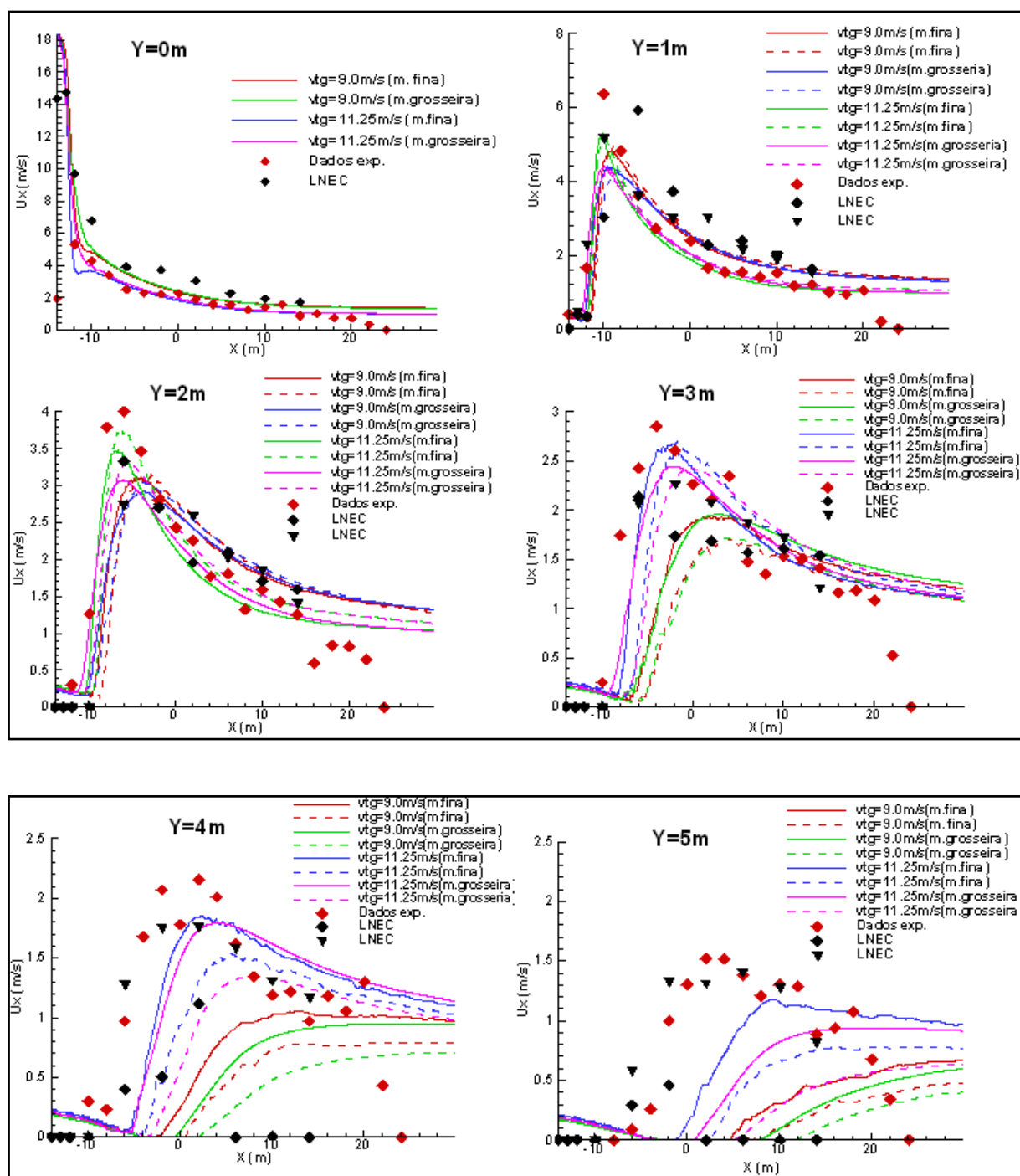
direito de 10m. Isso deve-se ao escoamento tomar uma figuração de escoamento tipo jacto (figura 4.12). Nesta situação, o escoamento não abre muito o que origina uma velocidade elevada ao longo do domínio computacional. Na situação do pé direito de 10m, verifica-se uma abertura maior do escoamento induzido pelo ventilador (figura 4.13) e os valores da componente  $U_x$  da velocidade assemelham-se aos valores obtidos experimentalmente quando utilizada a velocidade tangencial de referência, 11,25m/s.

### 4.3.2 Influência da malha para as simulações efectuadas

Um outro estudo consiste em quantificar a influência da discretização da malha. Para estas simulações foi utilizada a mesma geometria das simulações anteriores ( $z=2,5\text{m}$  e  $z=10\text{m}$ ) alterando apenas a discretização no domínio computacional. Para as novas simulações é pretendida uma malha de carácter mais grosseiro, ou seja, com um menor número de elementos. A vantagem da utilização de uma malha com menor número de elementos é reduzir o tempo de cálculo.

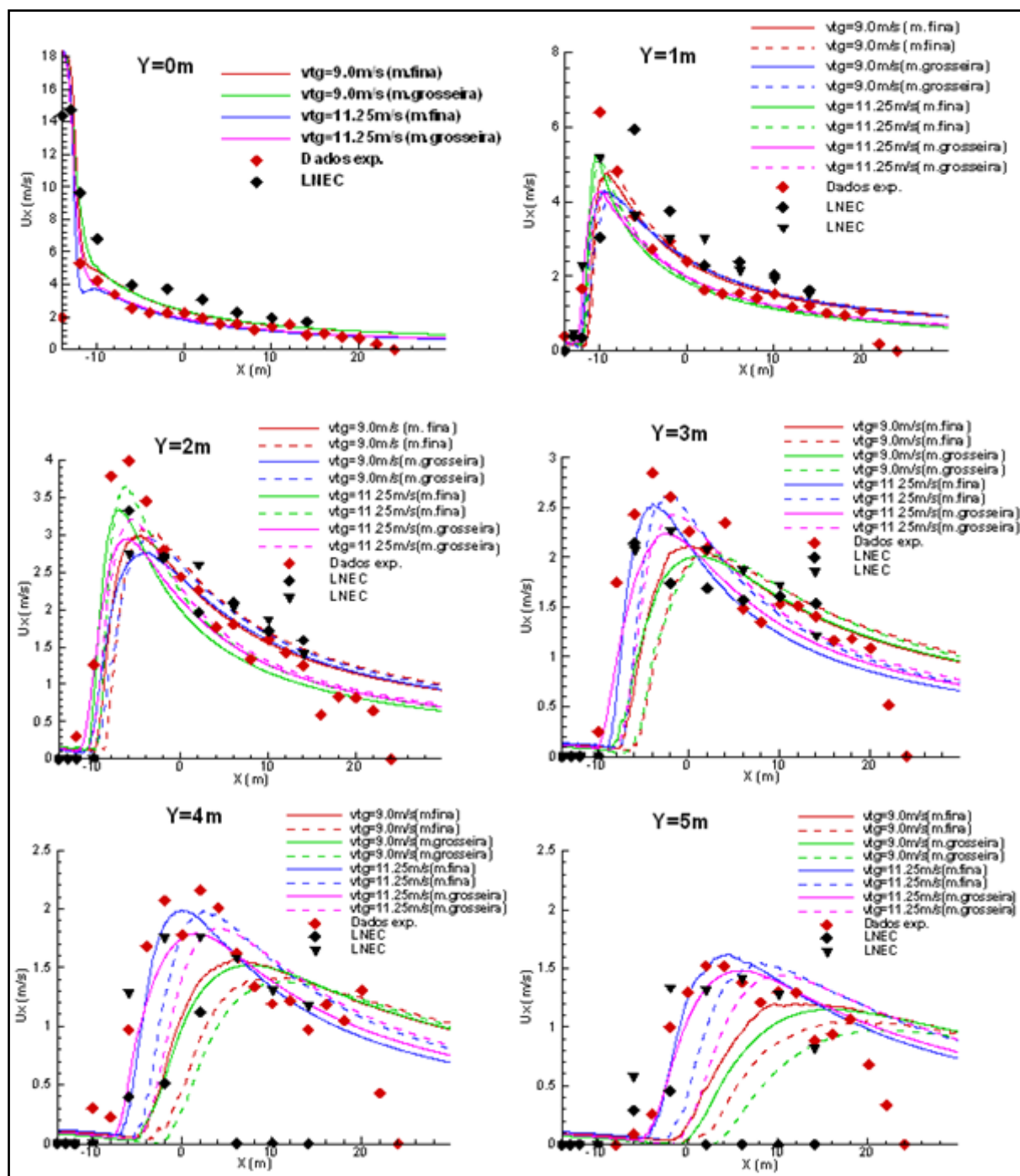
A redução de elementos teve como princípio um decréscimo na discretização de todos os intervenientes do domínio computacional, foi reduzido o número de elementos perto do tecto, na vertical, assim como perto do ventilador de impulso, tanto na secção de aspiração como na secção de insuflação.

Na figura 4.14 e 4.15 estão representados os perfis da componente horizontal da velocidade para as duas malhas, fina e grosseira, e os dois pés direitos. Os resultados são comparados com os dados experimentais.



**Figura 4.14** - Influência da malha nos perfis da componente horizontal da velocidade para o pé direito 2,5m





**Figura 4.15** - Influência da malha nos perfis da componente horizontal da velocidade para o pé direito de 10m

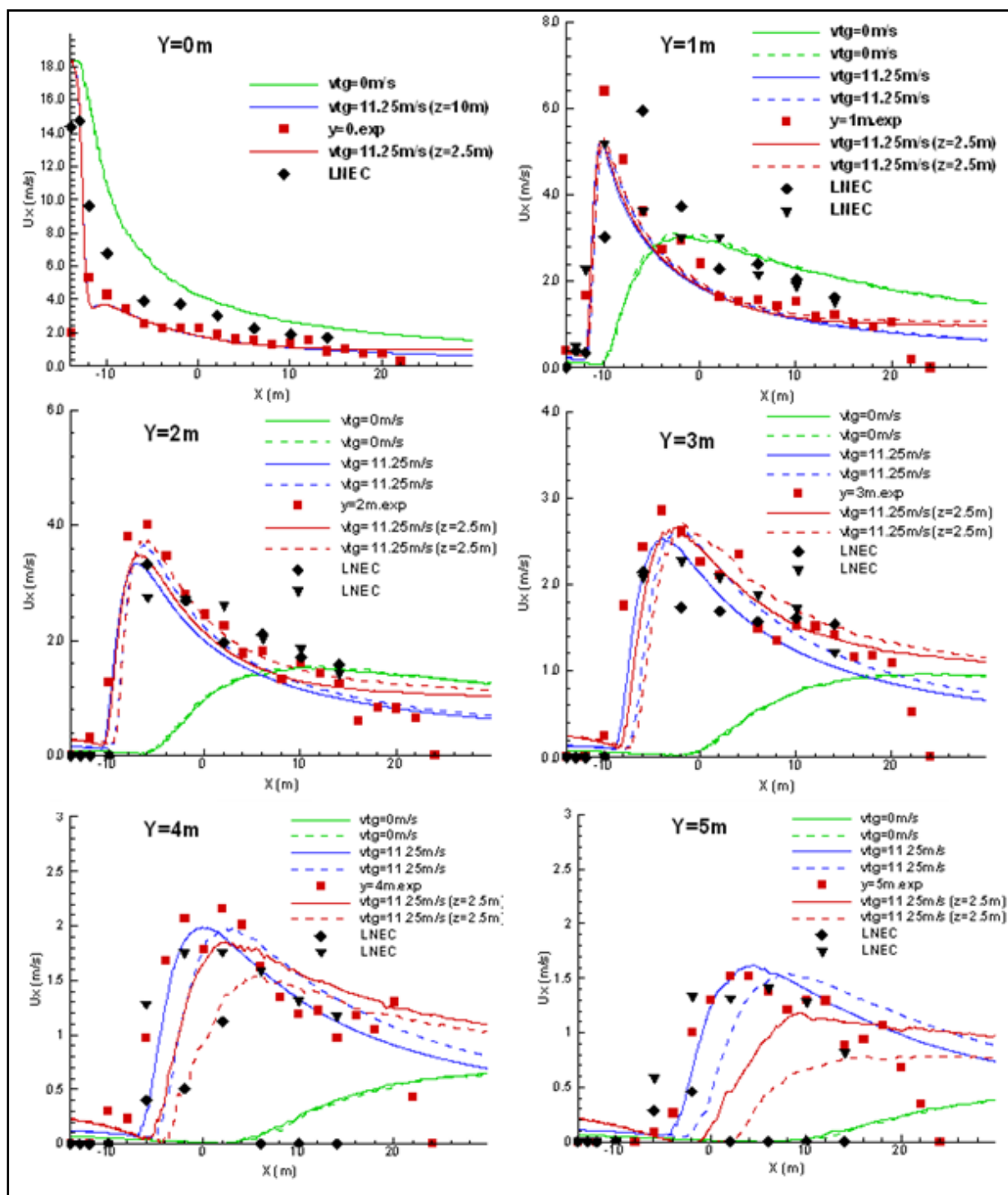
Das simulações efectuadas para as duas malhas e para as duas geometrias, constata-se conforme esperado, que a malha tem influência nos resultados. No entanto, a variação verificada não é muito significativa. No caso de as simulações terem como objectivo primário a investigação, recomenda-se que a escolha recaia numa malha de carácter fino, com um maior número de elementos. Deste modo garante-se uma precisão de resultados, aumentando também o tempo de cálculo. Este tempo é vantajoso em projectos de engenharia, onde a obtenção de resultados deve ser rápida. Nesta situação, pode-se optar por uma malha de carácter mais grosseiro, onde a validade dos resultados não é questionável.

### 4.3.3 Importância da velocidade tangencial “SWIRL”

A fim de completar a modelação do ventilador de impulso, procedeu-se à simulação numérica de um escoamento sem velocidade tangencial (swirl). O escoamento induzido pelo ventilador de impulso assume a forma de jacto. A simulação permite analisar a importância da velocidade tangencial, assim como o seu comportamento em domínios físicos diferentes, alterando-se o pé direito.

A simulação numérica foi realizada para os dois pés direitos,  $z=2,5\text{m}$  e  $z=10\text{m}$ . A simulação do modelo numérico do ventilador de impulso é efectuada com a velocidade tangencial de referência ( $11,25\text{m/s}$ ). As velocidades são comparadas com os dados experimentais.

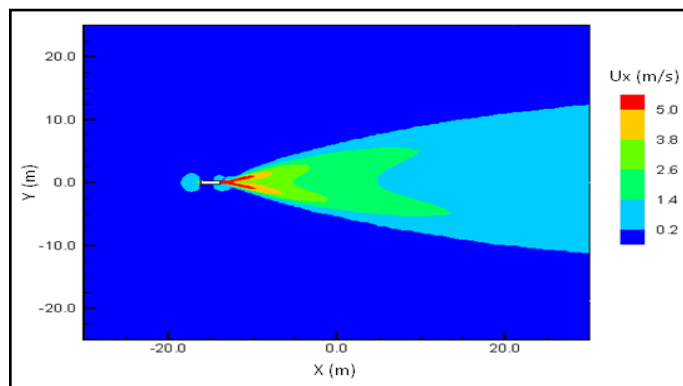
A figura 4.16 apresenta os perfis da componente horizontal da velocidade com e sem velocidade tangencial para os dois pés direitos e a comparação com os dados obtidos experimentalmente.



**Figura 4.16** - Comparação dos perfis de velocidade para os dois modelos numéricos de ventilador de impulso, com e sem swirl e os dois pés direito, de 2,5m e 10m.

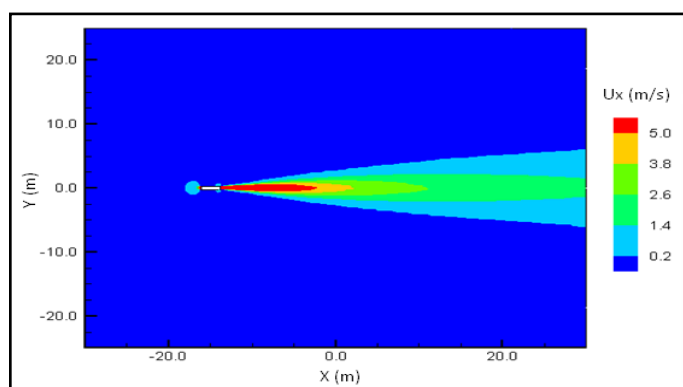
Da análise gráfica fomenta-se a existência de velocidade tangencial imposta no escoamento por parte do ventilador de impulso. A sua existência origina um escoamento aberto (figura 4.17) não simétrico, possibilitando contabilizar uma velocidade  $U_x$  mais elevada em locais

afastados paralelamente ao ventilador de impulso, do que no escoamento sem velocidade tangencial.



**Figura 4.17** - Componente  $U_x$  da velocidade no plano horizontal de referência:  $v_{tg}=11,25\text{m/s}$  e  $z=10\text{m}$

No caso da velocidade tangencial ser nula (figura 4.18), verifica-se a existência de um escoamento em forma de jacto, simétrico, com um alcance elevado no domínio computacional, mas com uma abertura reduzida.



**Figura 4.18** - Componente  $U_x$  da velocidade no plano horizontal no plano de referência:  $v_{tg}=0\text{m/s}$  e  $z=10\text{m}$

### 4.4 Conclusões

Das simulações numéricas realizadas verificou-se a existência de uma velocidade tangencial, que não deve ser menosprezada, induzida no escoamento pelas pás do ventilador de impulso.

Após uma primeira abordagem da calibração do modelo numérico de ventilador de impulso, analisaram-se alguns factores que poderiam influenciar o seu valor:

- O pé direito
- A malha

A alteração da malha, malha fina/malha grosseira, não induz alterações significativas no escoamento induzido pelo modelo numérico de ventilador de impulso. A utilização de uma malha grosseira fica assim validada para simulações numéricas semelhantes, proporcionando um tempo de cálculo reduzido, essencial para trabalhos de engenharia.

A alteração do pé direito, de 2,5m para 10m, origina uma alteração no escoamento do modelo numérico do ventilador de impulso. Para um pé direito de 2,5m, o escoamento induzido pelo ventilador de impulso tem uma abertura reduzida e um alcance superior, quando comparado com o escoamento obtido para um pé direito de 10m.

Foram comparados dois modelos numéricos de ventilador de impulso: o primeiro modelo numérico contabiliza a componente tangencial da velocidade (swirl) e a axial. O segundo contabiliza apenas a componente axial da velocidade, o escoamento é em forma de um jacto simples (sem swirl). Verifica-se que o escoamento sem swirl é simétrico, o que não é observado no escoamento com swirl. Esta diferença deve-se à interacção do escoamento rotacional, induzido pelo modelo numérico de ventilador de impulso com o tecto.

A calibração do modelo numérico de ventilador de impulso permitiu definir o valor da componente tangencial da velocidade, aproximadamente igual a 60% da sua velocidade axial.



## 5. Parque Simplificado

### 5.1 Introdução

A ventilação forçada em recintos fechados não é precedida apenas de um ventilador de impulso, mas é operada por um conjunto de ventiladores de impulso e axiais. O sistema de ventilação tem como objectivo restringir e remover os gases tóxicos, assim como forçar o escoamento do fumo em caso de incêndio para as aberturas de exaustão.

O parque simplificado é um parque simples, que permite analisar favoravelmente a sensibilidade do modelo numérico quando há alteração de alguns parâmetros em relação a um parque de estacionamento real, no parque simplificado é analisada a ocorrência de um incêndio. O local de incêndio foi escolhido de modo a analisar o desempenho dos ventiladores de impulso no confinamento e posterior extracção dos gases do parque de estacionamento. Para as simulações numéricas foram utilizados dois valores de energia libertada, um de 1MW e outro de 4MW (LNEC, 2009). Estes valores correspondem à média da potência convectiva da energia libertada por veículo pequeno, 2,6MW, e de um veículo de dimensões superiores, 5,2MW (Ministère de l' Equipement des Transports, 2003) respectivamente.

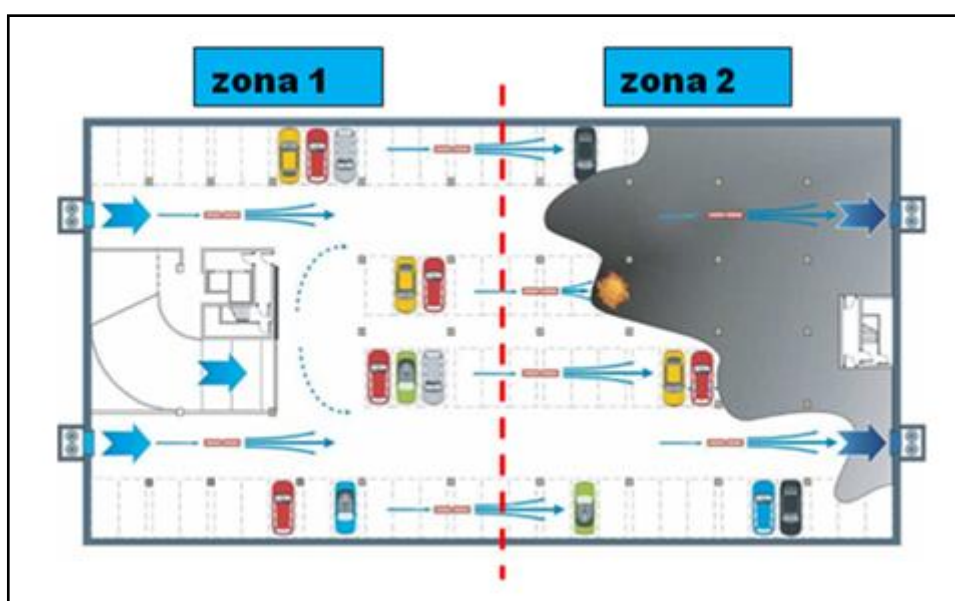
São realizadas simulações numéricas considerando a energia libertada de 4MW, de modo a analisar a sensibilidade de diferentes parâmetros na propagação de incêndio e observar o campo de temperatura:

- Alteração do volume da fonte de energia e do modelo de turbulência; influência do modelo de turbulência *K - $\epsilon$  Standard* e *K - $\epsilon$  Realizable* no campo de temperatura.
- Alteração do pé direito, 2,5m para 4,5m.
- Sensibilidade dos resultados através da alteração malha, utilizando uma malha mais grosseira.

## 5.2 Formulação do problema

Os ventiladores de impulso são colocados no interior de um parque de estacionamento de modo estratégico. A sua colocação tem como objectivo a remoção de gases tóxico e quentes do interior do parque assim como evitar locais de estagnação destes gases.

Um método utilizado de modo a encontrar a melhor disposição possível para a colocação dos ventiladores de impulso, e assim, possibilitar uma extracção dos gases eficiente, é criar zonas virtuais no interior do parque (figura 5.1).



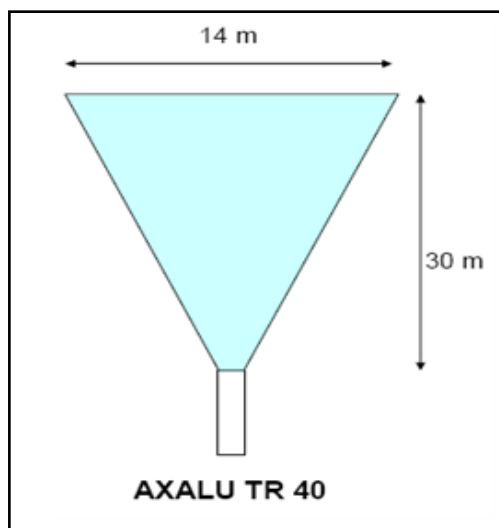
**Figura 5.1** - Divisão de um parque de estacionamento em zonas virtuais

Os ventiladores de impulso utilizados para as simulações numéricas, são ventiladores comerciais da empresa France-Air, gama AXALU-TR 40 RC, que respeita as mesmas características das simulações efectuadas no capítulo 4.

A geometria adoptada para o parque simplificado tem como finalidade observar o escoamento induzido pelo conjunto de ventiladores de impulso. Deste modo, as dimensões do parque foram adaptadas às características específicas do escoamento induzido pelo ventilador de impulso. A empresa que comercializa os ventiladores de impulso, faculta o alcance, assim como a abertura do jacto do ventilador de impulso (figura 5.2). Estes valores são estimativos



(France-Air, 2007), mas são utilizados no presente caso para determinar as dimensões do parque simplificado.



**Figura 5.2** - Alcance e abertura do escoamento induzido pelo ventilador de impulso

A velocidade axial, de valor 18,3 m/s, foi imposta na face de aspiração, assim como na face de insuflação, de modo a respeitar o caudal aspirado e induzido pelo ventilador de impulso. Na face de insuflação foi adicionada à velocidade axial, a componente tangencial da velocidade. Esta componente foi determinada no capítulo 4 e não pode ser desprezada, o seu valor é de 11,25m/s.

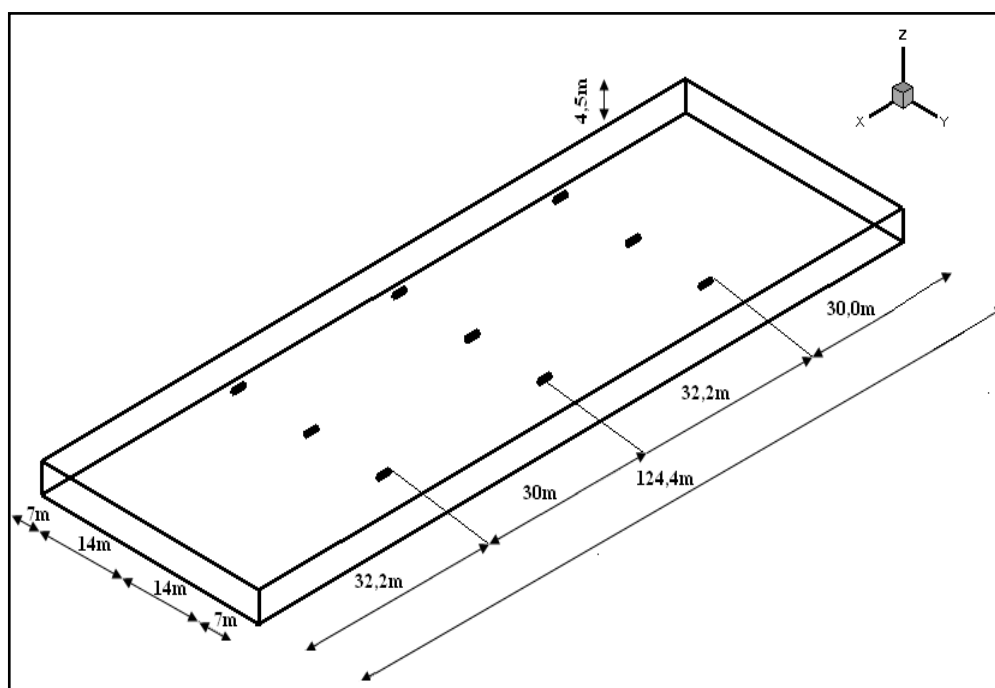
De modo a ser possível analisar a situação de incêndio no interior do parque, é necessário um ficheiro UDF (User Define Function), que permite impor condições limite específicas. O ficheiro permite impor a componente tangencial da velocidade (swirl) estabelecida, assim como impor a condição de propagação de temperatura nos ventiladores de impulso. Contabiliza a média da temperatura na face de aspiração do ventilador de impulso e impõe esse valor na face de insuflação do ventilador de impulso.

As simulações numéricas permitem observar a desenfumagem do parque alterando-se alguns parâmetros; o pé direito de 2,5m para 4,5m, influência da malha, malha fina/grosseira, e a influência do modelo de turbulência, *K - $\epsilon$  Standart* e *K - $\epsilon$  Realizable*.

### 5.2.1 Domínio computacional e condição limite.

A dimensão e discretização do domínio computacional são factores importantes para a modelação numérica do parque simplificado. A geometria adoptada é de dimensões reduzidas e respeita a informação prévia relacionada com o escoamento dos ventiladores de impulso. A escolha por um parque com esta configuração deve-se ao facto de ser necessário utilizar o menor número de ventiladores de impulso possível, neste caso 9. A escolha por outra geometria ocasionaria a necessidade de um maior número de ventiladores de impulso, o que implicaria uma malha com um maior número de elementos e assim um tempo de cálculo mais elevado.

A geometria adoptada neste estudo (figura 5.3) é estabelecida por um espaço de 124m de comprimento (longitudinalmente ao eixo dos ventiladores de impulso), por 42m de largura (perpendicular ao eixo dos ventiladores de impulso) e por 2,5m ou 4,5m de altura. Os ventiladores encontram-se colocados no tecto, com os seus eixos correspondentes distanciados de 14m entre si. Visto a colocação dos ventiladores tomar a posição de 3x3, as faces de aspiração/insuflação dos ventiladores encontram-se distanciados de 7m das paredes laterais.

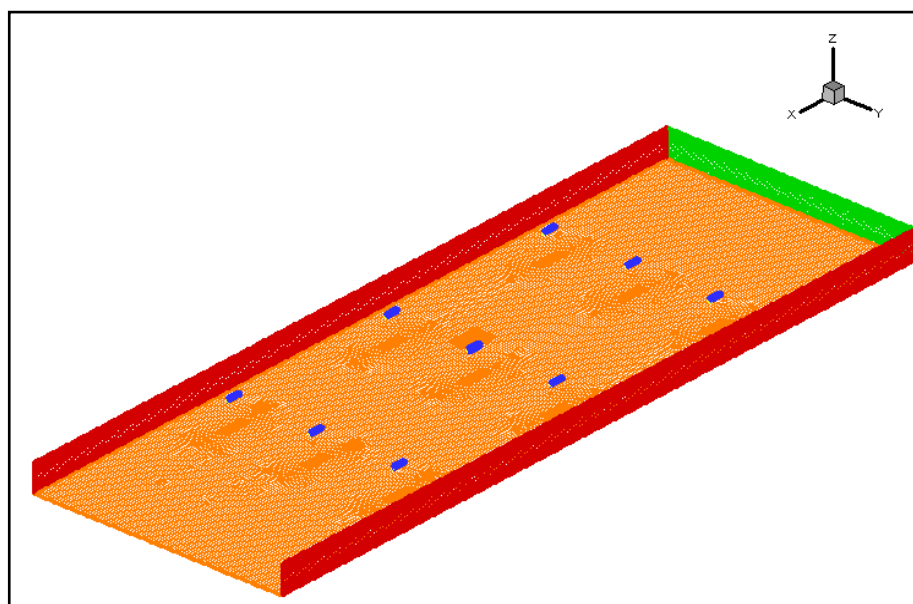


**Figura 5.3** - Domínio computacional: parque simplificado

As condições de fronteira designadas para o estudo do parque simplificado são as seguintes:

- Às fronteiras laterais (paralelas aos eixos do ventiladores de impulso) é atribuída uma condição de parede (sem aderência).
- A fronteira situada a montante assim como a fronteira situada a jusante dos modelos numéricos de ventiladores de impulso são simuladas como abertura livre.
- Os planos, inferior e superior,  $z=0\text{m}$ ,  $z=2,5\text{m}$  e  $z=4,5\text{m}$ , representam o chão e o tecto, pelo que é atribuído uma condição de fronteira de parede (de aderência).
- As secções de aspiração e insuflação dos modelos numéricos de ventiladores de impulso são simuladas por condições de velocidade.

A construção da malha do parque simplificado tem de respeitar uma construção cuidada e precisa. O domínio computacional é constituído por nove ventiladores de impulso, o que implica uma construção de malha similar para cada ventilador de impulso. A construção da malha deve conter um refinamento progressivo dos elementos, desde as paredes de um ventilador até ao ventilador seguinte ou até as fronteiras do domínio computacional. A malha deve conter o menor número de elementos possível, sem pôr em questão a validade da mesma (figura 5.4).



**Figura 5.4** - Malha do domínio computacional: parque simplificado

As simulações realizadas para o parque simplificado contemplaram duas geometrias, estas geometrias têm o objectivo de observar a influência do pé direito na propagação de gases tóxicos e quentes ao longo do domínio computacional ( $z=2,5\text{m}$  e  $z=4,5\text{m}$ ).

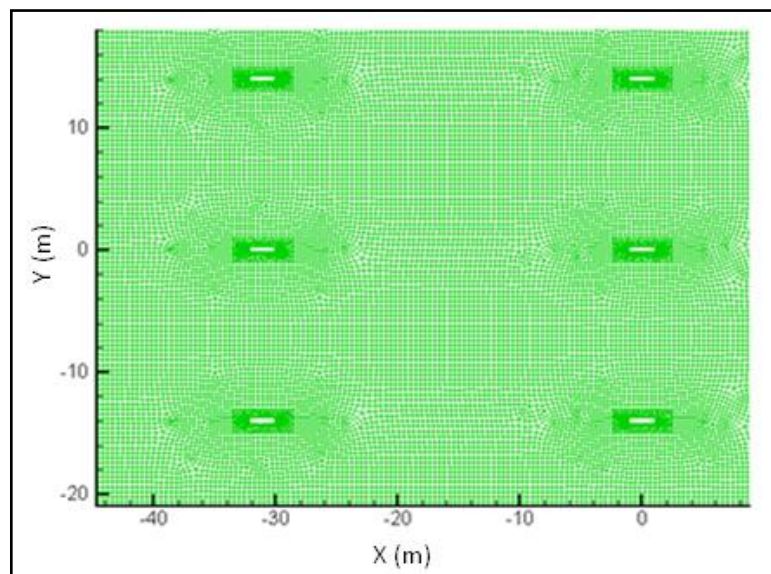
Foi também elaborada uma malha mais grosseira, com um número menor de elementos, apenas para o parque com um pé direito de  $2,5\text{m}$ .

Na tabela 5.1 estão presentes o número de elementos das malhas:

|                 | $Z= 2,5\text{m}$ | $Z= 4,5\text{m}$ |
|-----------------|------------------|------------------|
| Malha refinada  | 740.973          | 1.304.7711       |
| Malha grosseira | 332.337          | -----            |

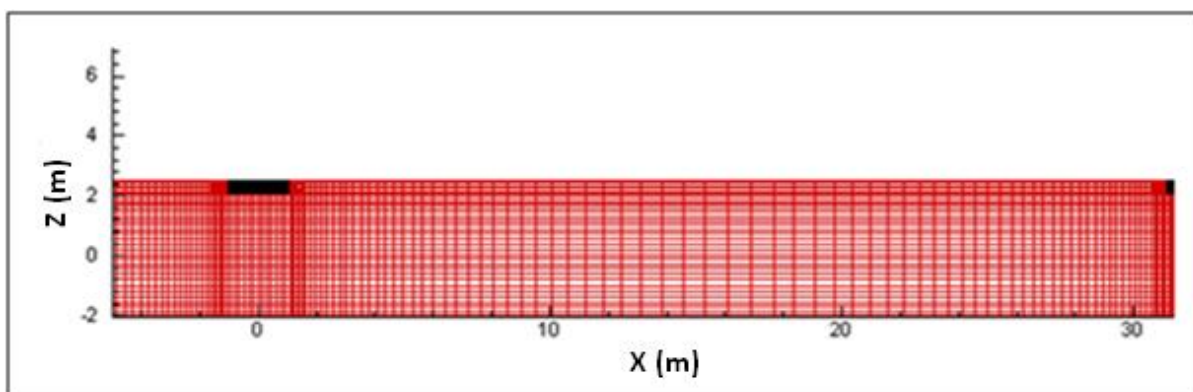
**Tabela 5.1** - Características das malhas utilizadas: parque simplificado

A malha utilizada para o domínio computacional respeita as condições de construção referidas no estudo do capítulo 4. A discretização é mais cuidada junto das faces de aspiração/insuflação dos modelos numéricos de ventiladores de impulso. É nestes locais que se verifica a existência de um maior número de elementos, que permite uma modelação mais eficaz da fase inicial do jacto (figura 5.5). Devido a não se perder informação, ou suscitar dúvidas das simulações, a discretização junto dos ventiladores de impulso é mantida mesmo quando se altera o pé direito de  $2,5\text{m}$  para  $4,5\text{m}$ .



**Figura 5.5** - Secção da discretização horizontal do domínio computacional, parque simplificado: plano  $z=2,25\text{m}$

Os ventiladores de impulso estão colocados no tecto do domínio computacional, proximidade esta, que origina uma perturbação do escoamento induzido pelos ventiladores de impulso. Devido a esta interacção é necessário proceder a uma discretização cuidada na direcção vertical e perto do tecto (figura 5.6).



**Figura 5.6** - Discretização vertical adoptada para o parque simplificado: plano  $y=0\text{m}$

### 5.2.2 Parâmetros da modelação numérica

As simulações numéricas para o parque simplificado foram realizadas através do código comercial FLUENT.

Na resolução do acoplamento entre a velocidade e a pressão utilizou-se o algoritmo SIMPLE. Os termos convectivos nas faces dos volumes de controlo são interpolados pelo esquema de terceira ordem QUICK assim como os termos difusivos das equações.

Os valores padrão dos factores sub-relaxação são os seguintes: 0,3 para a pressão; 0,8 para o momento; 0,7 para a energia cinética de turbulência e dissipação turbulenta; 1,0 para a viscosidade turbulenta modificada; e 0,8 para a energia.

Foram efectuadas simulações numéricas de modo a quantificar a influência dos modelos de turbulência adoptados. Foram utilizados dois modelos de turbulência, o modelo de duas equações  $K-\epsilon$  *Standart* e o modelo  $K-\epsilon$  *Realizable*. A diferença entre os modelos, é o incremento por parte do modelo  $K-\epsilon$  *Realizable* de um constrangimento da tensão normal, consistente com os princípios físicos de escoamentos turbulentos. Foi considerada a não existência de turbulência na entrada do domínio computacional. As únicas secções que contabilizam a existência de turbulência são as secções de insuflação, sendo este valor baixo, 5%.

As simulações numéricas para o parque simplificado vão solicitar a ocorrência de um incêndio no interior do domínio computacional. De modo a ser possível analisar esta nova situação é necessário proceder a algumas alterações no programa FLUENT: são consideradas as forças gravitacionais; a variação de densidade do ar é calculada através da equação dos gases perfeitos; temperatura ambiente é de 20°C; o escoamento é considerado estacionário.

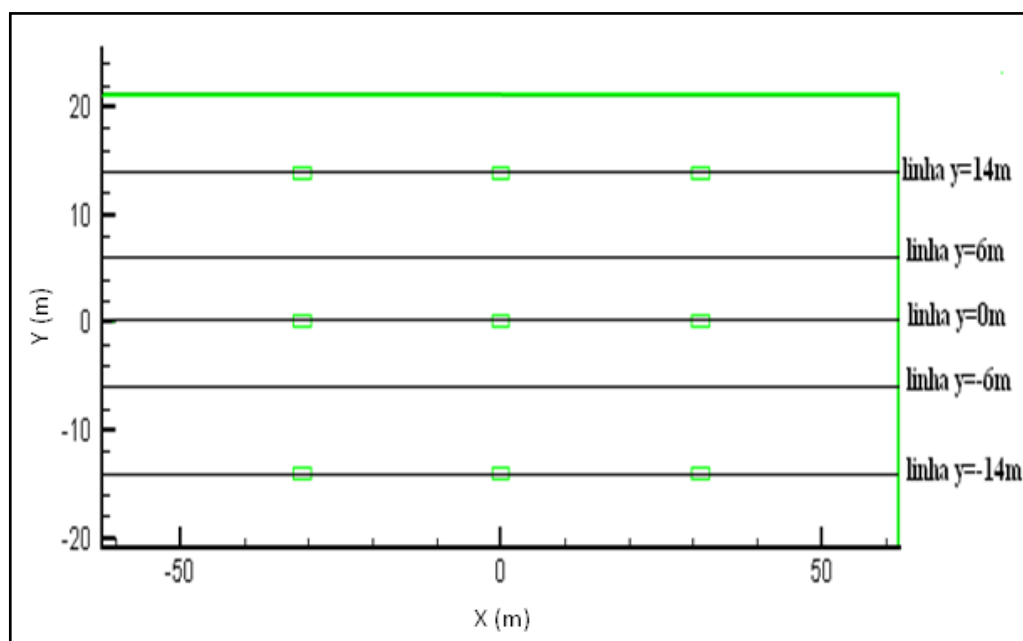
Considerou-se que as simulações atingiram a convergência durante o processo iterativo quando os resíduos estabilizaram, chegando aos patamares correspondentes dos resíduos mínimos para cada variável.

### 5.3 Resultados

As simulações numéricas realizadas pretendem analisar o escoamento desenvolvido pelos modelos numéricos de ventiladores de impulso. Deste modo, os ventiladores são colocados a funcionar em simultâneo e com iguais condições de funcionamento.

Para as simulações numéricas define-se como plano de referência o plano que passa pelo centro das secções de insuflação e extracção dos ventiladores de impulso. Os ventiladores de impulso encontram-se novamente fixos ao tecto e o plano de referência encontra-se distanciado de 0,25m deste.

De modo a ser possível analisar o campo de temperatura, foram criadas várias linhas longitudinais (figura 5.7) que atravessam o domínio computacional na sua totalidade, estas linhas permitem observar e quantificar a variação da temperatura imposta pelos ventiladores de impulso no domínio computacional.

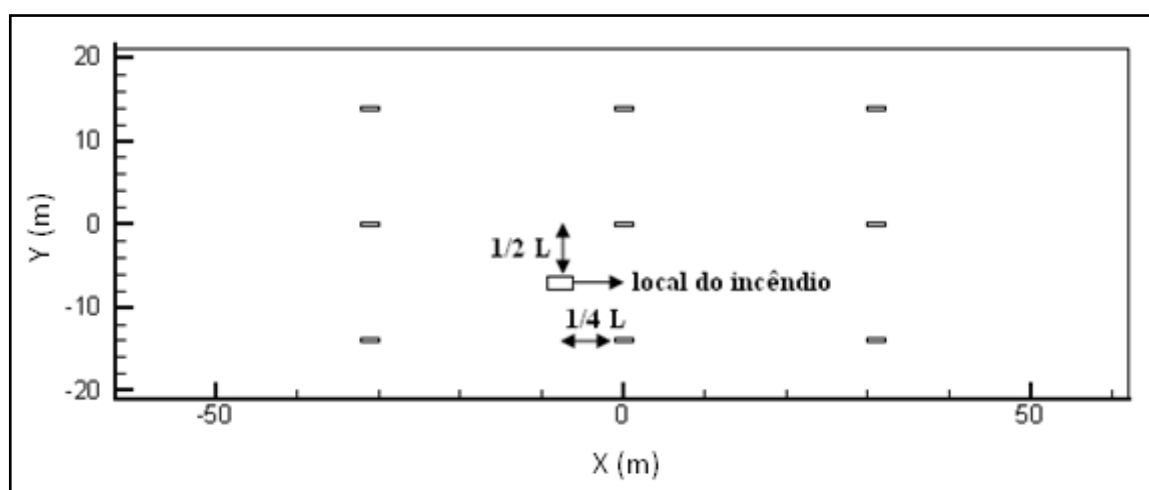


**Figura 5.7** - Plano de referência para o parque simplificado:  $z=2,25\text{m}$  e as linhas longitudinais

### 5.3.1 Incêndio no interior do domínio computacional

A escolha do local de incêndio (figura 5.8) pretende observar o escoamento dos gases quentes e tóxicos ao longo do domínio computacional. O local escolhido sofre influência dos ventiladores que se situam à esquerda assim como à direita do local de incêndio, permitindo que a fonte de energia sofra a interação dos escoamentos provenientes dos ventiladores de impulso circundantes.

As simulações numéricas realizadas pretendem analisar o campo de temperatura no parque assim como a propagação dos gases tóxicos, alterando-se a intensidade da fonte de energia, o volume da fonte de energia conservando a intensidade de 4MW, o pé direito e o modelo de turbulência. As condições de velocidade para os ventiladores de impulso mantêm-se iguais, velocidade axial de 18,3m/s, imposta nas secções de aspiração e insuflação e velocidade tangencial de 11,25m/s imposta apenas na secção de insuflação.



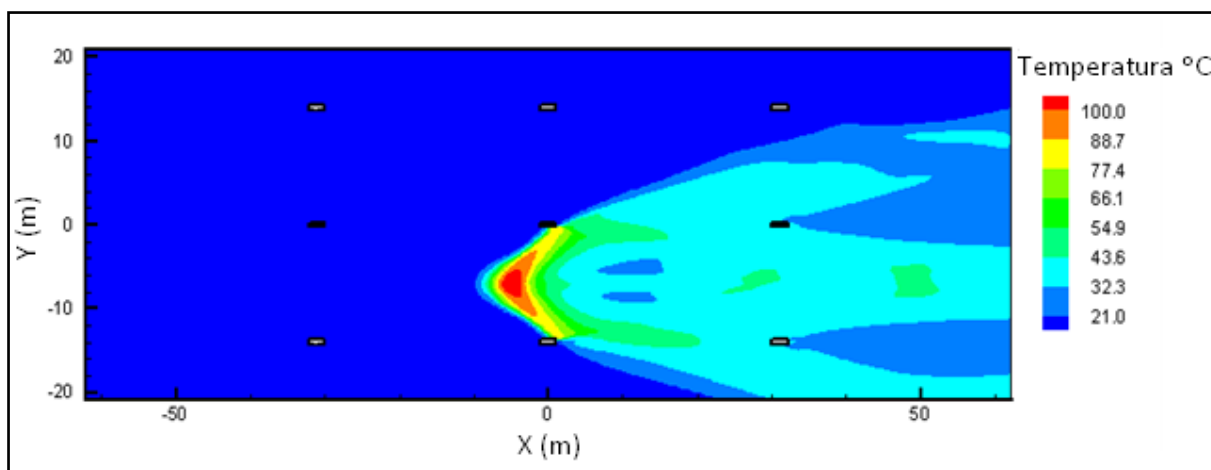
**Figura 5.8** – Local da fonte de calor

### 5.3.2 Intensidade da fonte de calor

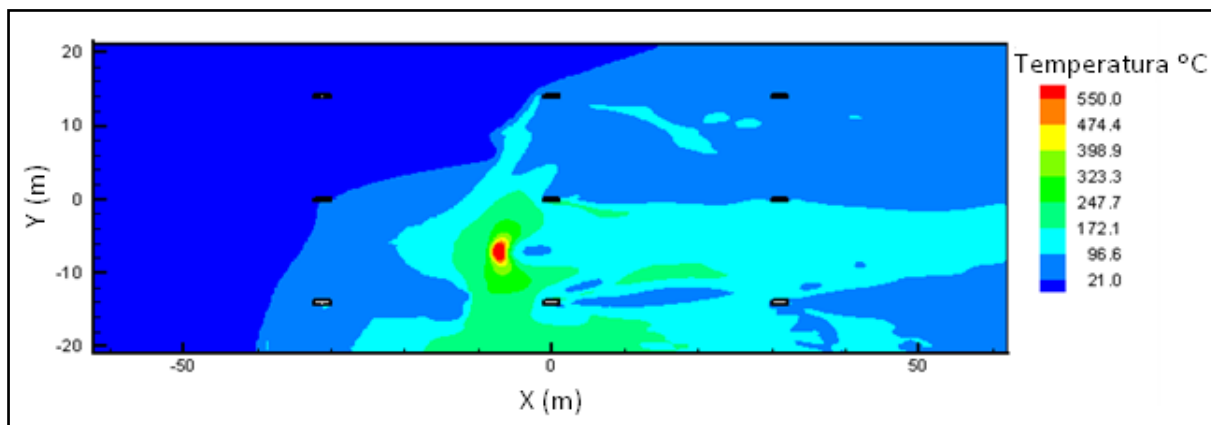
As simulações numéricas foram realizadas conservando o volume de  $7,7 \text{ m}^3$  para a fonte energia com uma intensidade de 1MW e 4MW. Este volume pretende simular um carro como origem do incêndio, com as dimensões de  $3\text{m} \times 1,7\text{m} \times 1,5\text{m} = 7,7\text{m}^3$ .

As figuras 5.9 e 5.10 representam o campo de temperatura e a propagação dos gases quentes e tóxicos ao longo do domínio computacional.





**Figura 5.9** - Campo de temperatura para uma fonte de energia de 1MW: plano  $z=2,25\text{m}$



**Figura 5.10** - Campo de temperatura para uma fonte de energia de 4MW: plano  $z=2,25\text{m}$

Como se pode verificar, a dispersão de gases quentes e o campo de temperatura atinge proporções diferentes para as situações de 1MW e 4MW.

Para a situação de 1MW a temperatura no local de incêndio é de 100°C. É libertada uma pequena quantidade de energia, que permite um bom confinamento e condução dos gases quentes e tóxicos pelo parque até à evacuação.

Para o segundo caso, onde se utiliza a fonte de energia de 4MW, a temperatura máxima no domínio computacional atinge valores superiores ao verificado na situação anterior. Atinge-se valores de 550°C e o comportamento dos gases quentes e tóxicos não mantêm o mesmo

comportamento verificado anteriormente. Nesta situação os gases tendem a propagar-se para montante do local de incêndio e transversalmente pelo parque simplificado.

Para ambas as situações observa-se a eficiência dos ventiladores de impulso, pois não permitem a propagação dos gases quentes e tóxicos por todo o domínio computacional. Os ventiladores de impulso impulsionam os gases para os limites, permitindo a posterior evacuação dos gases e mantendo uma temperatura reduzida a montante do local de incêndio.

### 5.3.3 Influência do volume para a situação de incêndio

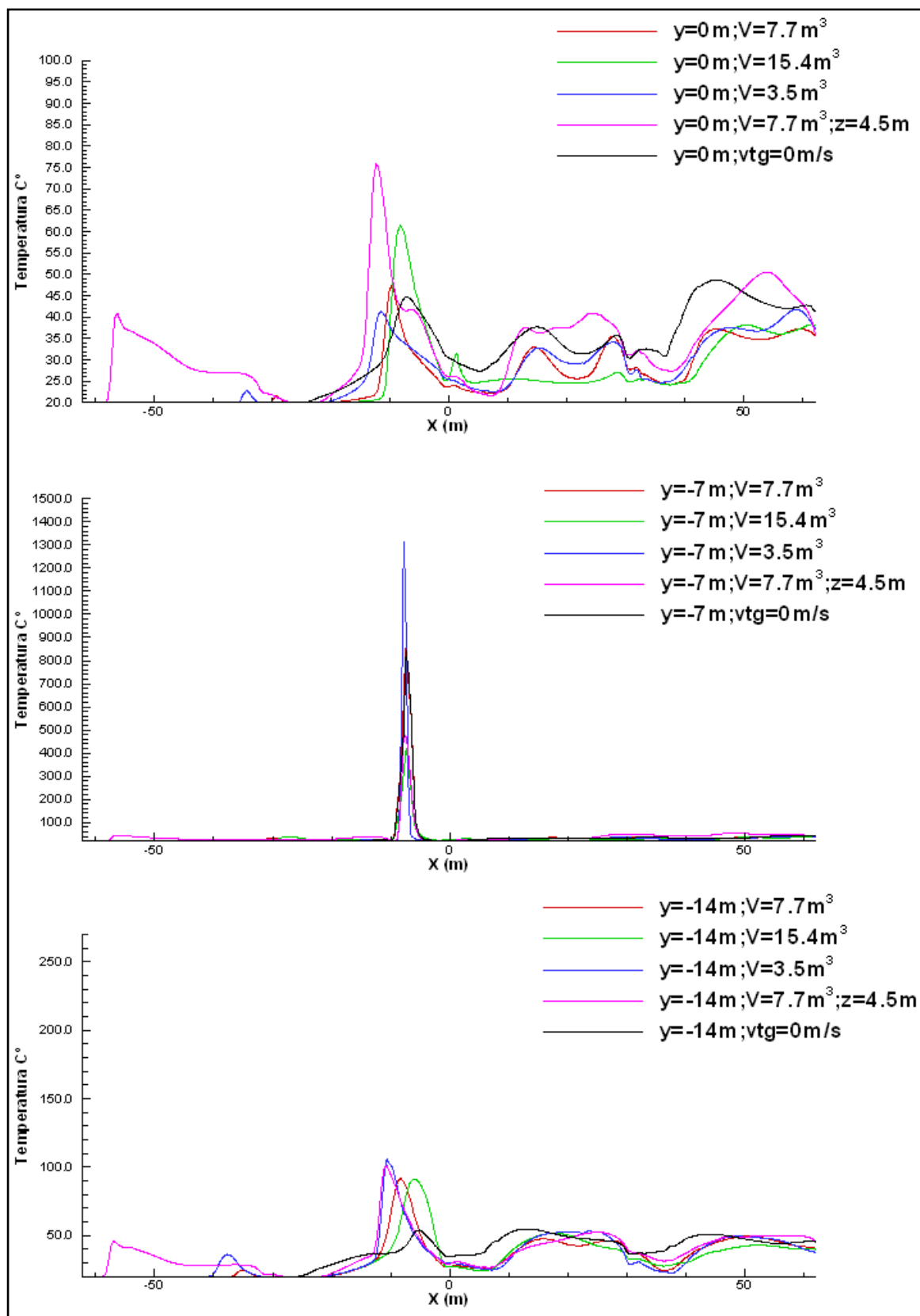
As seguintes simulações numéricas pretendem determinar a influência do volume do local de incêndio na propagação dos gases tóxicos e quentes assim como a respectiva temperatura atingida no interior do domínio computacional.

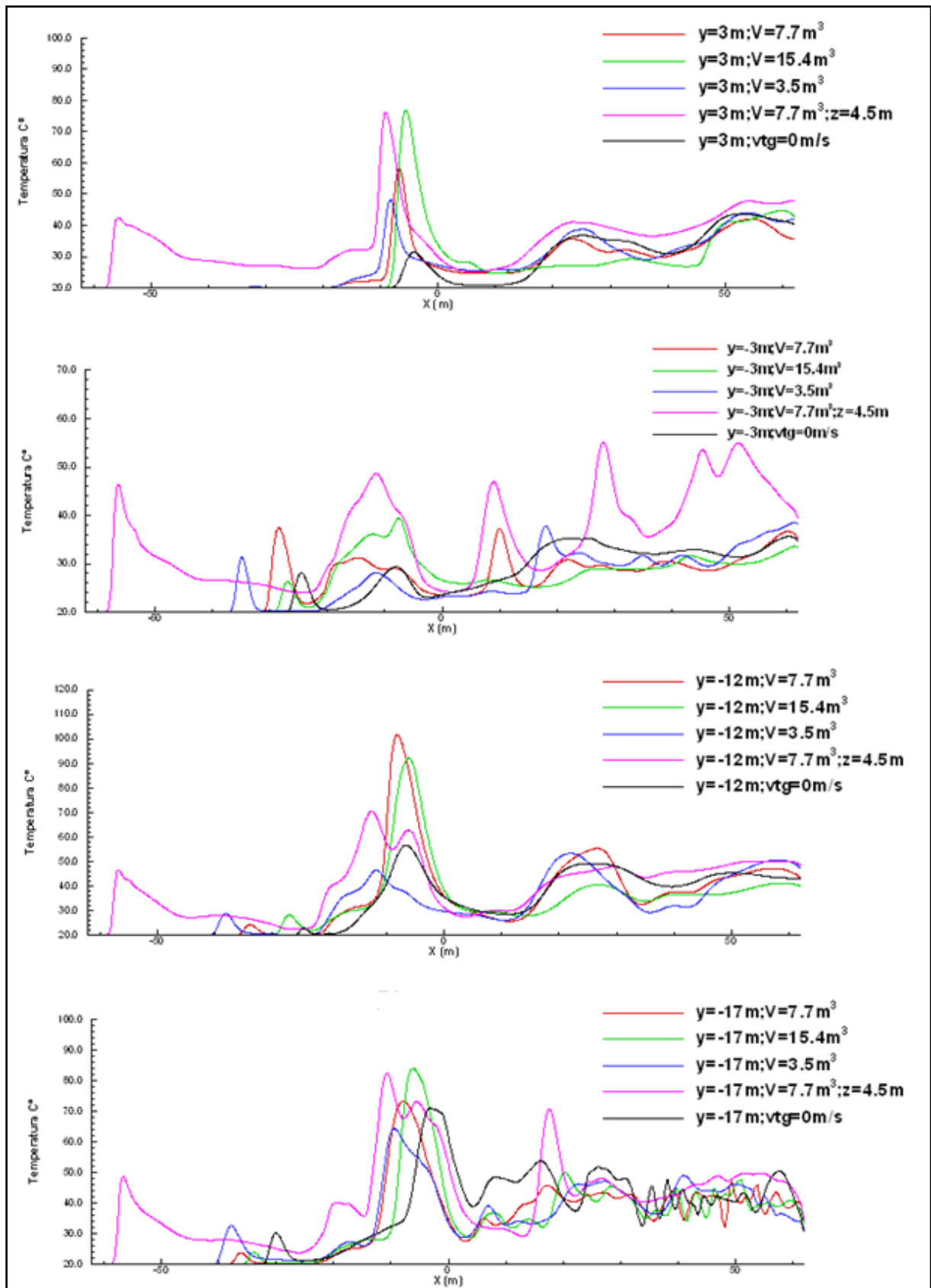
Para as seguintes simulações numéricas foram utilizados três volumes distintos, o volume utilizado anteriormente,  $7,7 \text{ m}^3$ , outro volume que é o dobro do volume anterior,  $15,4 \text{ m}^3$  e por fim o volume de  $3,5 \text{ m}^3$  que é metade do volume inicial. Para as simulações numéricas foi utilizada a intensidade de 4MW para a fonte de energia. Foram mantidas as condições de funcionamento dos ventiladores de impulso.

De modo a ser possível visualizar o campo de temperatura e a propagação dos gases quentes pelo domínio computacional recorreu-se a uma análise gráfica. A análise gráfica compara os valores de temperatura no interior do domínio computacional para as três situações distintas de volume,  $7,7 \text{ m}^3$ ,  $15,4 \text{ m}^3$  e  $3,5 \text{ m}^3$ . Ao conjunto é adicionado o caso em que se alterou o pé direito de 2,5m para 4,5m e o caso em que se retirou a componente tangencial dos escoamentos providos pelos ventiladores de impulso.

A figura 5.11 representa a evolução da temperatura ao longo do domínio computacional. Os valores são referentes às linhas longitudinais indicadas na figura 5.7. A linha  $y=0\text{m}$  refere-se à linha que passa pelo centro dos ventiladores de impulso situados na linha central. Para estes casos foram analisados os resultados em dois níveis: o plano de referência, que passa pelo centro das secções de aspiração/insuflação, que se encontra a 0,25m do tecto, e no plano situado a 1,5m do chão.

A figura 5.11 é representativa da evolução da temperatura ao longo do domínio computacional para o plano horizontal que dista 1,5m do chão.





**Figura 5.11** - Evolução da temperatura no domínio computacional: plano horizontal  $z=1,5\text{m}$

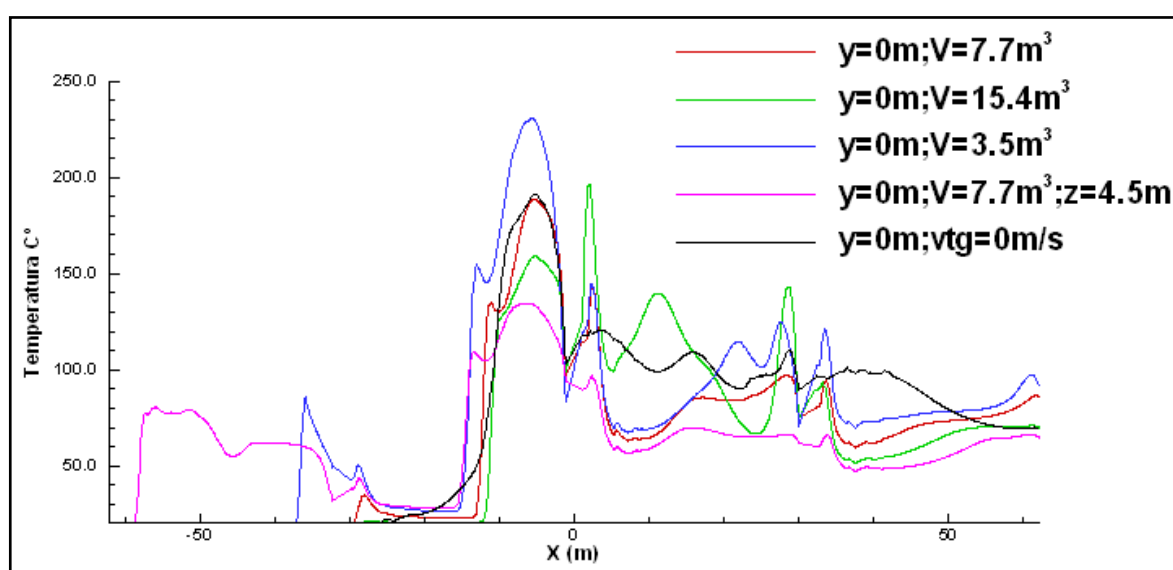
Da análise gráfica conclui-se que no local de origem do incêndio,  $y=-7\text{m}$ , a temperatura máxima atinge-se para a situação de volume de  $3,5\text{m}^3$ .

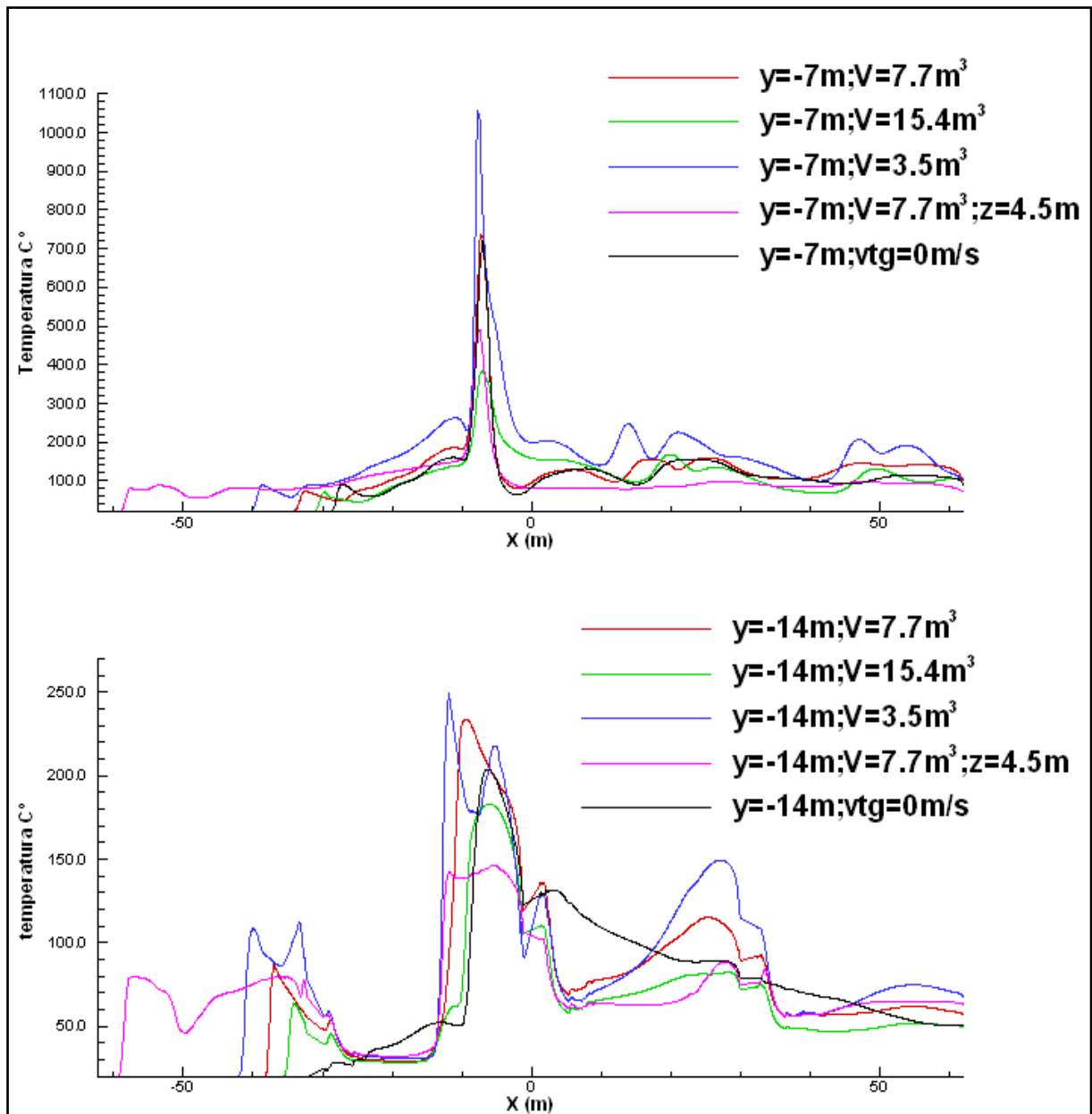
Para as situações analisadas pode-se referir que para a mesma fonte de calor,  $4\text{MW}$ , a situação mais crítica observa-se para o caso do pé direito de  $4,5\text{m}$ . Nesta situação, a expansão dos gases quentes e tóxicos é mais acentuada, perto da totalidade do parque. O caudal induzido no parque é igual para o pé direito de  $2,5\text{m}$  assim como para o pé direito de  $4,5\text{m}$ . Como a área de entrada para o pé direito de  $4,5\text{m}$  é superior, a velocidade na entrada é inferior, deste modo os gases propagam-se para montante e ocupam perto da totalidade do parque.

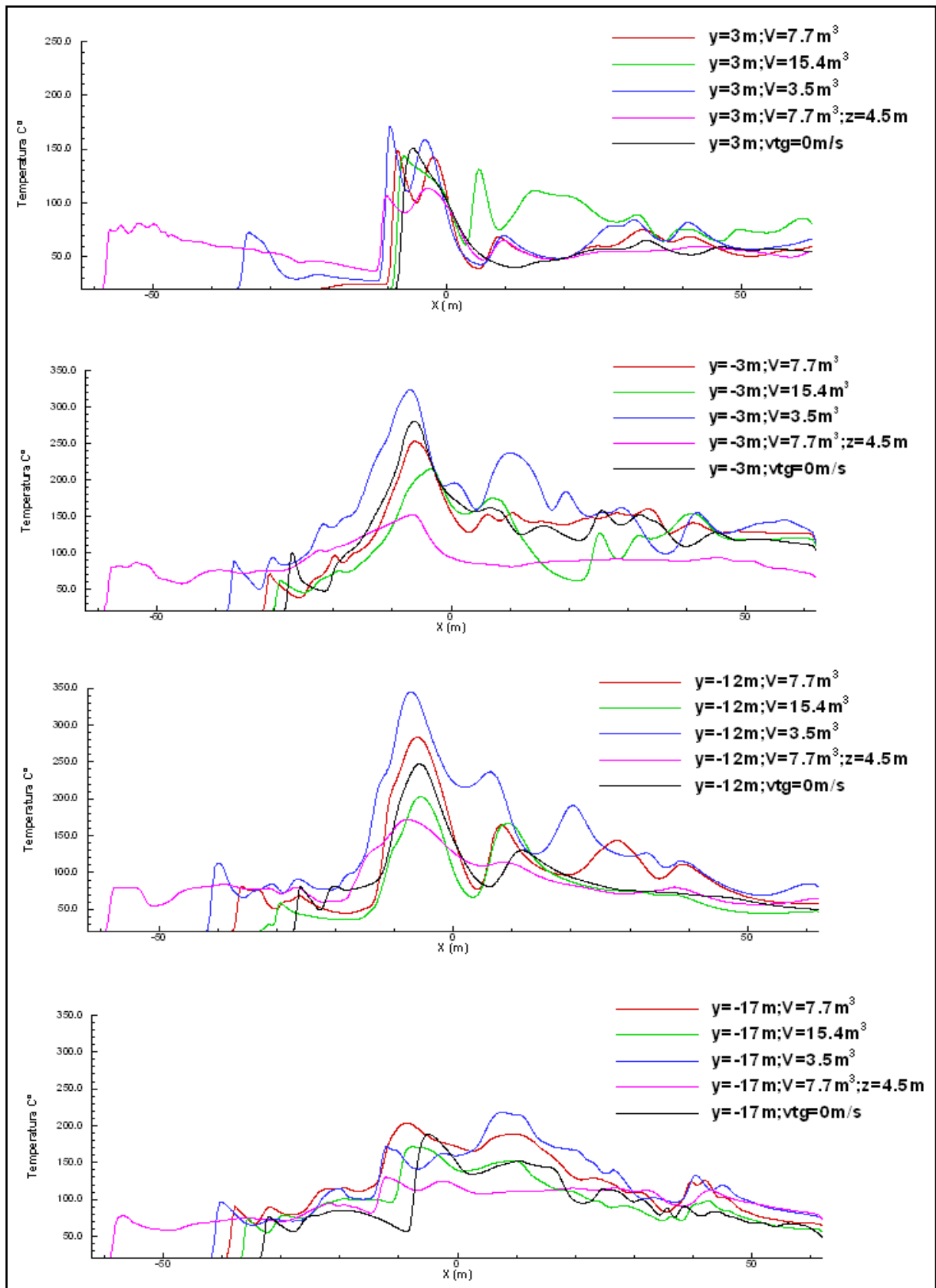
Atinge-se uma temperatura superior para as situações em que a fonte de calor está retida num volume superior, que é o caso de  $7,7\text{ m}^3$  e  $15,4\text{m}^3$ . Esta situação é revogada para o local onde ocorre o sinistro, onde se atinge uma temperatura muito elevada para o caso do volume inferior.

No caso desta configuração de parque de estacionamento, estreito e assimilável a um túnel longo, não se observa uma influência considerável na modelação dos ventiladores de impulso com e sem componente tangencial da velocidade.

A figura 5.12 demonstra a evolução da temperatura ao longo do domínio computacional para o plano de referência, plano  $z=2,25\text{m}$ ,  $0,25$  do tecto.





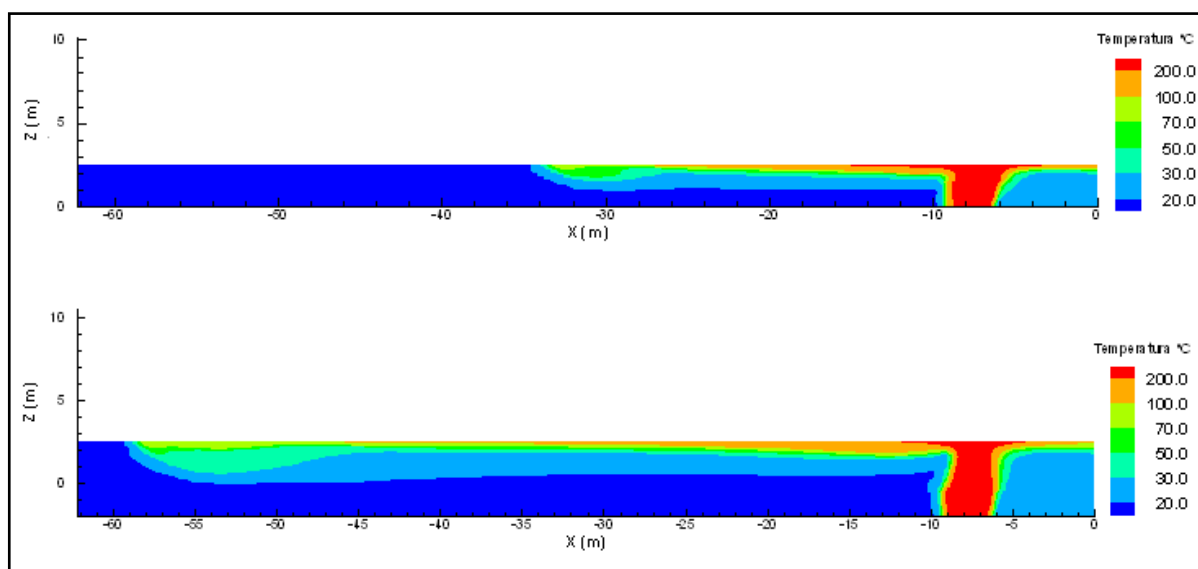


**Figura 5.12** - Evolução da temperatura ao longo do domínio computacional: plano de referência

Da análise efectuada, junto do tecto observa-se que os gases quentes e tóxicos concentram-se perto do tecto e propagam-se junto deste. A concentração dos gases origina que as temperaturas sejam mais elevadas perto do tecto. Constata-se que a temperatura assume um carácter similar para as situações analisadas para  $z=1,5\text{m}$ , ao longo do parque, exceptuando-se os locais junto do foco de incêndio, onde a variação do volume influencia uma alteração do campo temperatura.

Na análise anterior foram analisados factores, como, pé direito, volume da fonte de energia e influência da componente tangencial da velocidade na propagação dos gases quentes. De seguida, é analisada a propagação dos gases quentes, utilizando-se um volume de  $7,7\text{m}^3$  e uma energia de  $4\text{MW}$ , quando é alterado o pé direito, de  $2,5\text{m}$  para  $4,5\text{m}$ .

A figura 5.13 representa o campo de temperatura para as duas situações analisadas, pé direito de  $2,5\text{m}$  e  $4,5\text{m}$ . Trata-se do plano vertical que passa pelo foco de incêndio.

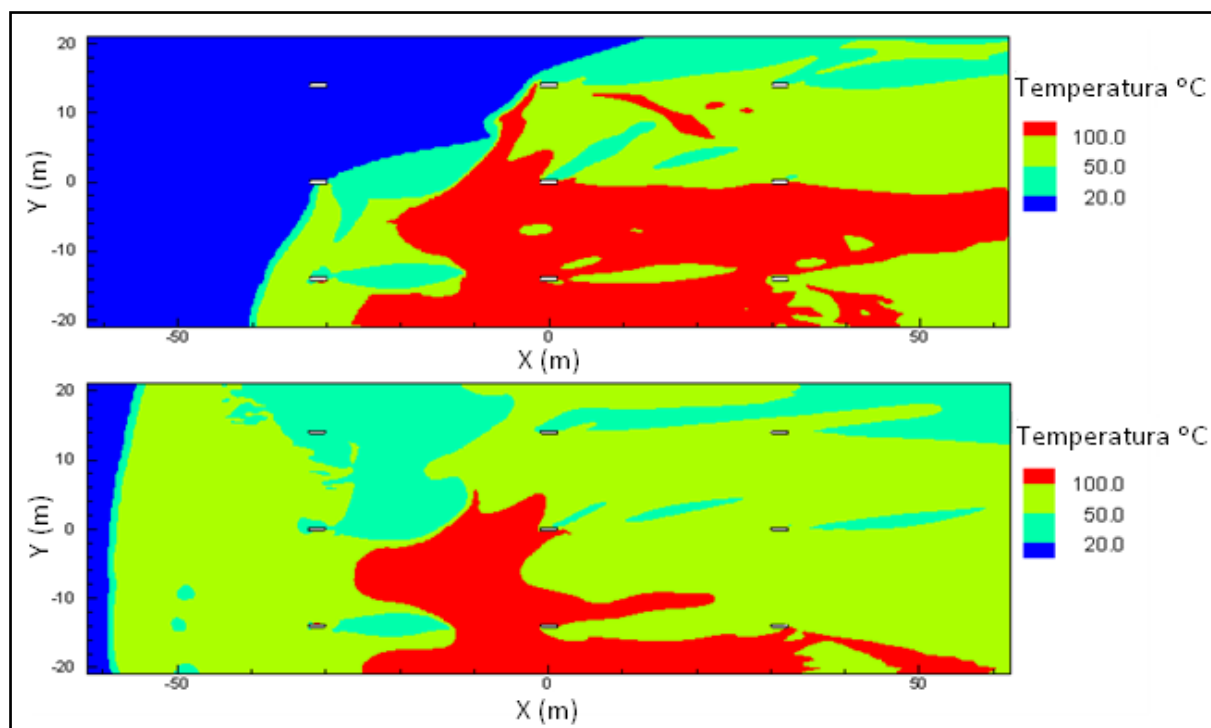


**Figura 5.13** - Campo de temperatura para o pé direito de  $2,5\text{m}$  e  $4,5\text{m}$ : foco de incêndio



Observa-se que a utilização de um pé direito elevado, 4,5m, origina uma propagação mais abrangente dos gases quentes pelo parque. O caudal induzido no parque é igual para os dois pés direitos, de 2,5m e 4,5m. A área de entrada é superior para o pé direito de 4,5m, o que causa uma velocidade de entrada inferior em relação ao pé direito de 2,5m. Os gases quentes ocupam perto da totalidade do parque, esta ocupação origina graves problemas estruturais do edifício, a área danificada pelos gases quentes é elevada. Os factores menos condicionantes na utilização de um pé direito superior são a temperatura e a espessura da pluma térmica. A temperatura atingida é inferior e a altura disponível para circulação de pessoas é superior em relação ao pé direito de 2,5m.

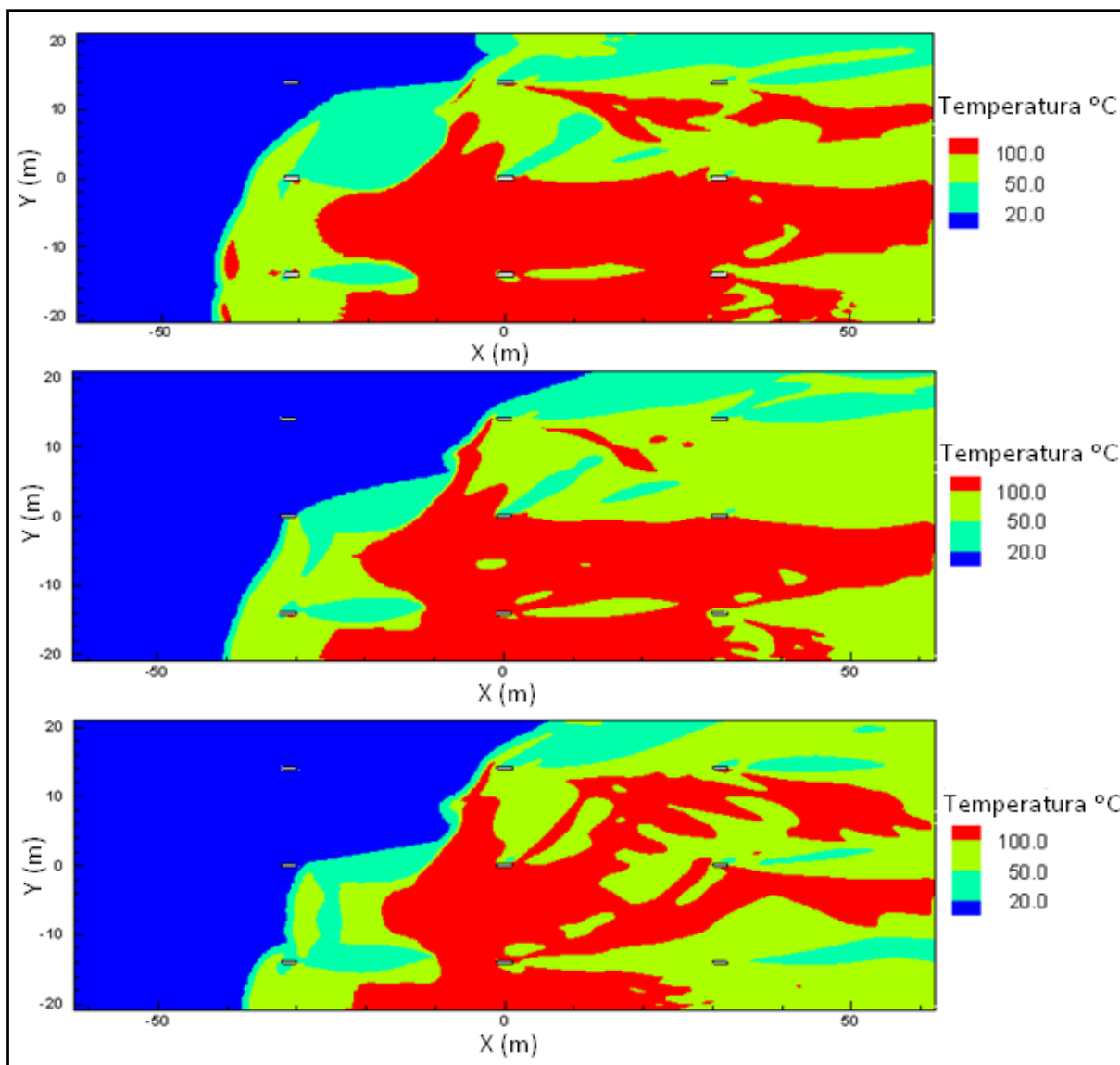
Na figura 5.14 está representado o campo de temperatura para as duas situações analisadas. Trata-se do plano horizontal que passa pelo centro da face de insuflação dos modelos numéricos de ventiladores de impulso.



**Figura 5.14** - Campo de temperatura para o volume de 7,7m<sup>3</sup>: pé direito 2,5m e 4,5m

Outro factor analisado é a influência do volume da fonte de energia na propagação dos gases quentes pelo parque.

Na figura 5.15 estão representados os campos de temperatura para os volumes de 3,5m<sup>3</sup>, 7,7m<sup>3</sup> e 15,4m<sup>3</sup>.



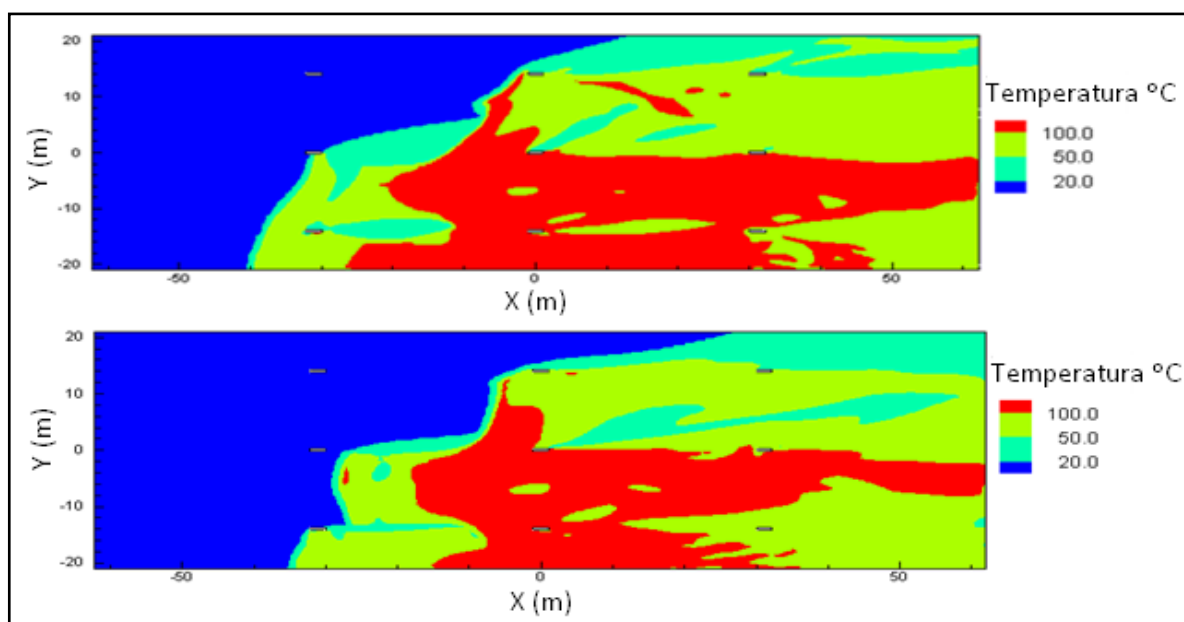
**Figura 5.15** - Campo de temperatura para os 3 volumes: 3,5 m<sup>3</sup>; 7,7 m<sup>3</sup> e 15,4 m<sup>3</sup>.

Verifica-se que para as situações em que se altera o volume da fonte de calor, o campo de temperatura é semelhante para as três situações. Os gases quentes e tóxicos são confinados a jusante do local de incêndio e conduzidos pelo parque de modo a ser possível a sua exaustão para o exterior. O confinamento dos gases a jusante do local de incêndio permite a evacuação dos ocupantes, realizada de jusante para montante, relativamente ao local de incêndio, permite assegurar as condições ambientais adequadas à permanência dos bombeiros e facilitar a

aproximação destes com boa visibilidade ao local do incêndio. Da análise do foco de incêndio verifica-se que o volume tem influência na temperatura. Para o volume pequeno, a temperatura é superior e para o volume maior a temperatura é menor.

A última situação analisada é a importância da componente tangencial da velocidade no confinamento dos gases quentes. Para a análise da influência da componente tangencial da velocidade é utilizado o pé direito de 2,5m e o volume de 7,7 m<sup>3</sup>.

Na figura 5.16 está representado o campo de temperatura para as duas situações analisadas, escoamento provido pelos modelos numéricos dos ventiladores de impulso com e sem componente tangencial da velocidade.



**Figura 5.16** - Campo de temperatura para o volume de 7,7m<sup>3</sup> e pé direito de 2,5m: com e sem swirl

Nota-se que a montante do local de incêndio, a expansão dos gases quentes é ligeiramente diferente. No entanto, a diferença não é muito importante neste caso, onde o parque se comporta como um túnel. Uma análise semelhante será apresentada no capítulo seguinte, no caso de um parque de estacionamento real.

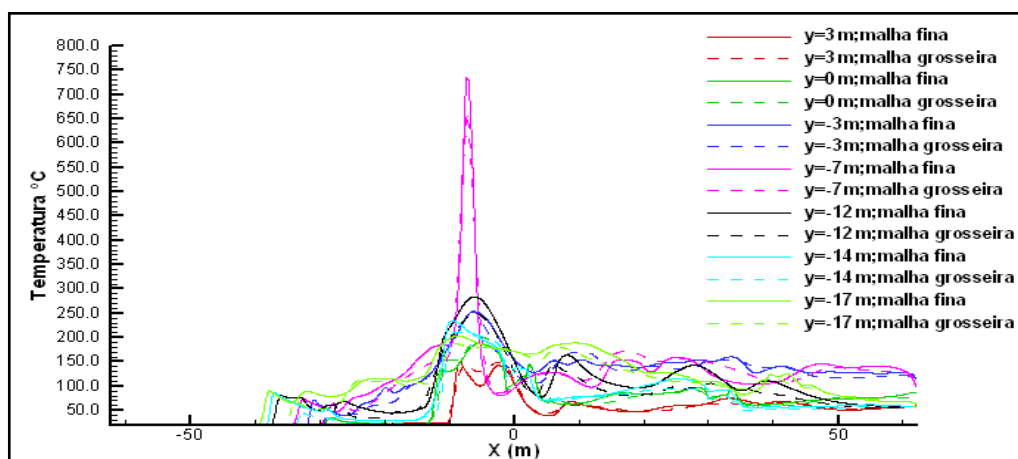
### 5.3.4 Influência da malha para as simulações efectuadas

Foram realizadas duas malhas, malha fina e malha grosseira, para a geometria de 2,5m. A utilização de uma discretização diferente tem como objectivo analisar a influência da malha na evolução do campo de temperatura no parque.

A geometria utilizada é a mesma das simulações numéricas anteriores. A intensidade de energia libertada é de 4MW e o volume do foco de incêndio é de 7,7m<sup>3</sup>. Os ventiladores estão a insuflar com a velocidade axial de 18,3m/s e com a componente tangencial de 11,25m/s.

A redução do número de elementos tem como principio um decréscimo na discretização de todos os intervenientes no domínio computacional, desde o número de elementos na discretização vertical, perto do tecto, nas faces de aspiração/insuflação dos ventiladores assim como fronteiras do domínio computacional.

Na figura 5.17 está representada a variação da temperatura para as duas malhas adoptadas (malha fina/malha grosseira). As medições de temperatura foram realizadas nas linhas longitudinais utilizadas nas simulações numéricas anteriores.



**Figura 5.17** - Variação da temperatura, malha fina malha grosseira: plano de referência, z=2,25m

Verifica-se que a utilização de uma malha com um menor número de elementos, malha grosseira, não implica uma alteração significativa na obtenção de resultados. A validade da utilização de uma malha grosseira possibilita uma redução no tempo de cálculo, otimizando assim a execução de projectos de engenharia.

### 5.3.5 Influência do modelo de turbulência

O modelo de turbulência adoptado para proceder às simulações numéricas é o modelo de turbulência ***K - $\epsilon$  Standard***. De modo a observar a influência do modelo de turbulência nas simulações numéricas optou-se por utilizar outro modelo de turbulência, entre outros passíveis de utilização pelo software FLUENT, optou-se pela utilização do modelo de turbulência ***K - $\epsilon$  Realizable***.

O modelo de turbulência ***K - $\epsilon$  Realizable*** é um modelo mais recente que difere do modelo ***K - $\epsilon$  Standard*** em dois pontos:

- No modelo ***K - $\epsilon$  Realizable*** está presente uma nova formulação para a viscosidade turbulenta.
- Uma nova equação de transporte para a taxa de dissipação,  $\epsilon$ , derivada da equação exacta de transporte da flutuação da vorticidade.

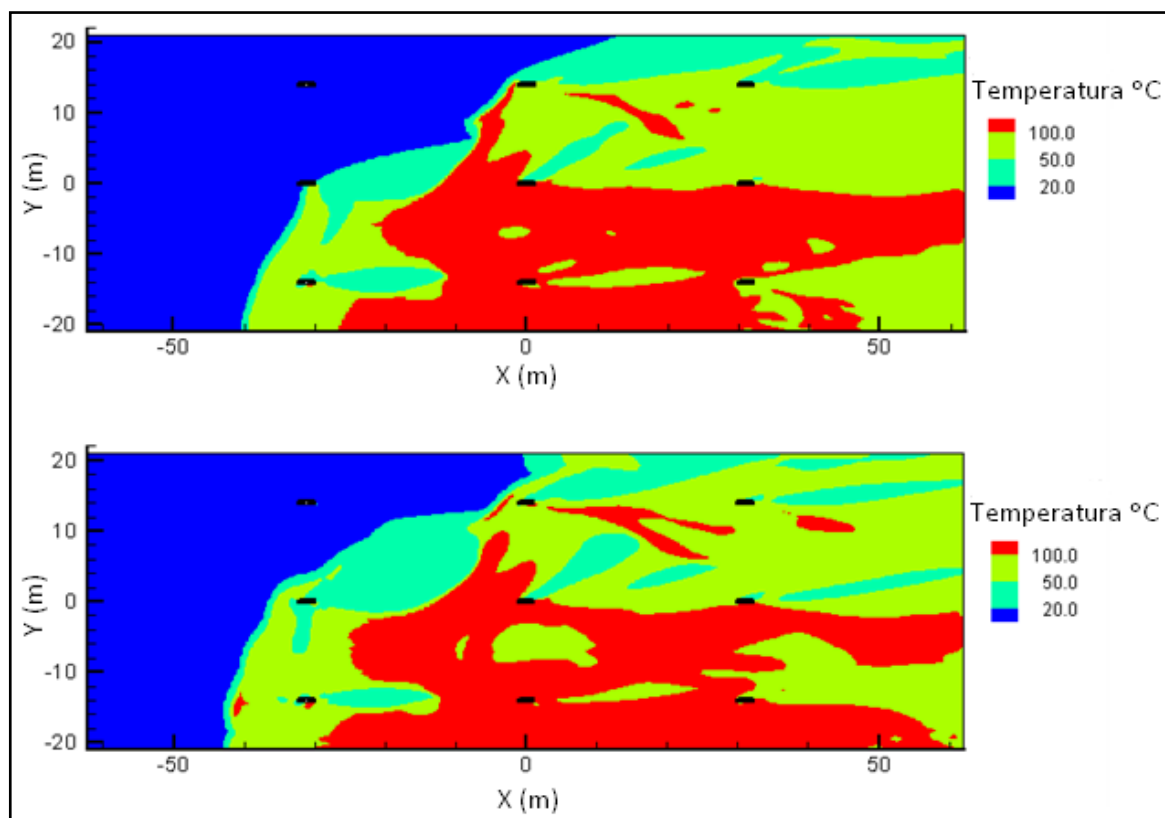
O termo Realizable significa que o modelo satisfaz certas restrições matemáticas sobre as tensões de *Reynolds*, coerente com a física de escoamentos turbulentos.

O modelo de turbulência ***K - $\epsilon$  Realizable*** demonstra melhorias substanciais sobre o modelo de turbulência ***K - $\epsilon$  Standard*** onde os escoamentos padrão incluem forte curvaturas, vórtices e rotações.

Para as simulações numéricas optou-se pelas seguintes condições limite:

- Intensidade de energia libertada 4MW.
- Volume do foco de incêndio 7,7 m<sup>3</sup>.
- Os ventiladores de impulso estão a insuflar com velocidade axial de 18,3 m/s e a componente tangencial de 11,25m/s.

Na figura 5.18 está representada a variação de temperatura no plano  $z=2,25\text{m}$  para os dois modelos de turbulência, ***K - $\epsilon$  Standard*** e ***K - $\epsilon$  Realizable***.



**Figura 5.18** - Campo de temperatura, modelo de turbulência *K - $\epsilon$  Standard* e modelo *K - $\epsilon$  Realizable*: plano de referência  $z=2,25\text{m}$

Com base na figura anterior verifica-se não existir uma diferença significativa na extensão dos gases quentes pelo parque quando se altera o modelo de turbulência. A utilização de um modelo de turbulência mais complexo, *K - $\epsilon$  Realizable*, não proporciona para as simulações numéricas efectuadas uma mais-valia nos resultados obtidos.

## 5.4 Conclusões

As modelações computacionais, realizadas neste capítulo, têm como objectivo analisar a desenfumagem de um parque de estacionamento, parque simplificado, através de ventiladores de impulso. As simulações numéricas permitem analisar:

- O desempenho dos ventiladores de impulso em caso de ocorrer um incêndio no parque.
- A sensibilidade do modelo numérico para o mesmo valor de energia mas alterando o volume da fonte de energia e o modelo turbulência.
- A influência do pé direito e da malha.

Da análise da modelação de um incêndio, quando se altera o volume da fonte de energia observa-se uma concordância do campo de temperatura e da respectiva expansão dos gases quentes pelo parque. Os gases quentes propagam-se para jusante do local de incêndio, no sentido de funcionamento dos ventiladores de impulso libertando locais a montante do local de incêndio. Deste modo, a evacuação dos ocupantes, que se faz de jusante para montante do local de incêndio, é mais eficiente e possibilita uma intervenção mais rápida e eficiente por parte dos bombeiros, pois as condições ambientais e de visibilidade estão asseguradas. É de salientar que no foco de incêndio e nos locais próximos, observa-se que para a mesma fonte de energia, 4MW, o campo de temperatura está relacionado com o volume. Um volume reduzido implica uma temperatura superior e vice-versa.

O caudal induzido no parque simplificado é igual para os dois pés direitos analisados. Devido a este facto, e a área de entrada ser superior para o pé direito de 4,5m, a velocidade de entrada é inferior para o pé direito de 4,5m. Observou-se que quando se altera o pé direito, 2,5m para 4,5m, o campo de temperatura e a expansão de gases quentes também se altera. Para a situação de pé direito de 4.5m, a expansão dos gases quentes é superior, mas a temperatura é inferior. Quando se tem um pé direito de 2,5m, o comportamento é o oposto, ou seja, uma expansão reduzida associada a uma temperatura superior. A propagação dos gases quentes verifica-se junto ao tecto. Para a situação do pé direito de 4,5m, a pluma térmica tem uma espessura maior, sensivelmente de 2,5m, à pluma térmica verificada para o pé direito de 2,5m, que é de 1,5m. Este facto é menorizado devido à altura livre disponível para a circulação de pessoas, que é de 2m para a situação de pé direito de 4,5m, em relação à altura disponível para

circulação de pessoas para o pé direito de 2,5m, que é de apenas 1m. Devido à vasta propagação dos gases quentes para o pé direito de 4,5m, assiste-se a uma degradação dos materiais e da infra-estrutura superior em relação ao pé direito de 2,5m, onde o confinamento e a evacuação dos gases quentes são realizados de modo mais eficiente.

Para a situação em que se alterou a discretização da malha, verifica-se que a temperatura no foco de incêndio é superior quando a malha adoptada para as simulações numéricas é mais refinada. No entanto, no parque não existe uma alteração significativa no campo de temperatura, pode-se, assim, utilizar uma malha com menor número de elementos que não altera o resultado e proporciona tempo de cálculo reduzido.

A utilização de dois modelos de turbulência, *K -ε Standard* e *K -ε Realizable* não altera de maneira significativa os resultados do campo de temperatura e respectiva propagação de gases quentes e tóxicos no parque.

Observa-se que a expansão de fumos é similar quando é imposta a componente tangencial da velocidade (swirl) na face de insuflação dos ventiladores de impulso e quando é retirada da face de insuflação. A semelhança deve-se às dimensões do parque, que tem configuração próxima de um túnel. Das várias simulações realizadas, observa-se que os ventiladores têm a capacidade de confinar e proceder ao encaminhamento dos gases quentes ao longo do parque para posterior evacuação para o exterior. Este procedimento faz com que a montante do local de incêndio não se observe uma variação significativa da temperatura, a temperatura observada é similar à temperatura ambiente.



## **6. Estudo de desenfumagem de um parque**

### **6.1 Introdução**

Este capítulo apresenta a modelação numérica da desenfumagem de um parque real. Para este estudo é considerado o piso -4 do parque de estacionamento da Brisa.

Para as seguintes simulações numéricas são contabilizados os obstáculos que se encontram no piso do parque, como acesso a elevadores, acesso a escadas, saídas de emergência, etc. As dimensões destes obstáculos podem ser suficientemente relevantes para influenciar o escoamento provido pelo conjunto dos ventiladores de impulso e criar zonas de estagnação e de recirculação no interior do parque. No entanto, os pilares de secção circular não são considerados.

Pretende-se determinar o melhor modelo de funcionamento do sistema de ventilação, a matriz de comando, em caso de ocorrer um incêndio no piso do parque. Esta matriz de comando deve permitir ligar o sistema de ventilação e controlar assim os fumos produzidos em caso de incêndio. Deve assegurar assim a evacuação das pessoas e facilitar a intervenção dos bombeiros.

A fim de completar a modelação numérica da desenfumagem do parque de estacionamento, é realizada uma simulação numérica em regime não estacionário. Esta simulação tem como finalidade analisar a evolução de um incêndio no interior do parque. Analisado o momento onde se observa a maior intensidade de energia libertada e correspondente campo de temperatura, estabelece-se uma comparação entre o resultado obtido para a simulação em regime estacionário e a simulação numérica em regime transitório.

## 6.2 Formulação do problema

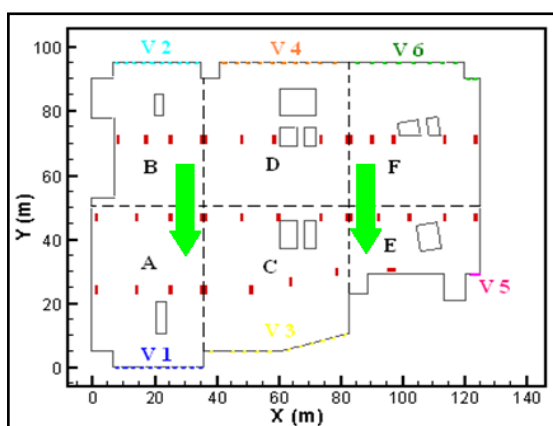
As simulações numéricas pretendem maximizar o funcionamento do conjunto dos ventiladores de impulso e ventiladores axiais, ou seja, uma configuração do sistema de ventilação que permita uma boa confinção dos gases quentes e tóxicos e uma boa extracção destes gases por parte dos ventiladores axiais.

O piso -4 do parque de estacionamento da Brisa (figura 6.1) contém 37 ventiladores de impulso distribuídos pelo interior do parque e colocados no tecto. Os ventiladores axiais, V1 ao V6, procedem à insuflação e à extracção através de grelhas múltiplas colocadas nas paredes. Para as simulações numéricas considerou-se que as portas corte fogo de acesso ao piso -3 estão encerradas (configuração indicada na matriz de comando).

O piso -4 do parque de estacionamento da Brisa tem as seguintes características:

- Pé direito de 3m.
- Não há vigas aparentes no tecto.
- Neste ponto das simulações numéricas os pilares de secção circular de diâmetro 0.7m não são consideradas.

Na figura 6.1 estão assinaladas as seis zonas virtuais, zona A até F, do piso -4 do parque assim como o sentido de funcionamento do sistema de ventilação.



**Figura 6.1** - Plano do piso -4 do parque de estacionamento: posição dos ventiladores de impulso, das grelhas dos ventiladores axiais e sentido de funcionamento

A divisão do parque em zonas virtuais e a reversibilidade do sistema de ventilação permitem adaptar o funcionamento conforme a localização do foco de incêndio. Os ventiladores axiais podem funcionar em insuflação como em extracção e os ventiladores de impulso são totalmente reversíveis.

Os dados de funcionamento do sistema de ventilação são anunciados a seguir:

Ventiladores axiais, insuflação/extracção:

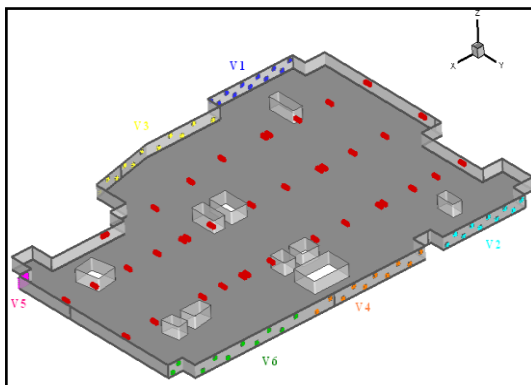
- Caudal: 70000 / 140000m<sup>3</sup>/h (19,4 / 38,9 m<sup>3</sup>/s).
- A ventilação, para os ventiladores axiais V1 até ao V4 e V6 é realizada através de grelhas colocadas nas paredes. A sua altura é alternada entre os 0,5m e os 2m do chão. Estas grelhas têm a dimensão de 1,0m x 0,6m.
- O ventilador axial V5, é uma grelha é colocada na parede, com dimensões de 3,10m x 2,5m, ou seja 7,75m<sup>2</sup>.

Ventiladores de impulso:

- Modelo AXALU TR-35 da France Air.
- Diâmetro do ventilador 0,355m, com comprimento de 2,3m, altura e largura de 0,46m.
- Área da secção circular do ventilador é igual a 0,99m<sup>2</sup>.
- Caudal de 0,9 / 1,8m<sup>3</sup>/s para as duas velocidades de funcionamento.
- Velocidade média do ar na saída do ventilador de impulso é de 9,09 / 18,19 m/s para o caudal mínimo e máximo respectivamente.

### 6.2.1 Domínio computacional e condições limite

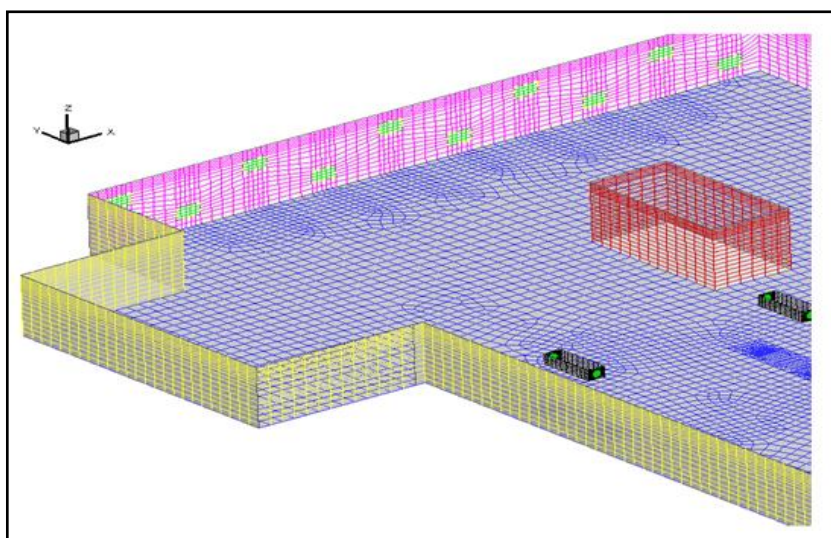
O domínio computacional do piso -4 do parque de estacionamento da Brisa é de grandes dimensões (figura 6.2) (10026.56 m<sup>2</sup>). A colocação dos ventiladores de impulso tem que respeitar a geometria do parque de estacionamento, as características de alcance e a abertura dos ventiladores de impulso utilizados.



**Figura 6.2** - Vista 3D do piso -4 do parque de estacionamento da Brisa

Dadas as dimensões do parque e suas características físicas, a malha do domínio computacional é constituída por 1.200.000 elementos. Nas zonas onde a variação de temperatura e velocidade é mais acentuada, a malha é mais refinada. Estas zonas são designadamente a entrada e saída dos ventiladores de impulso, as grelhas dos ventiladores axiais colocadas nas paredes e a zona envolvente do local do incêndio.

A figura 6.3 representa a malha de uma zona do domínio computacional, onde aparecem alguns ventiladores de impulso, um bloco de escadas, as grelhas dos ventiladores axiais, as paredes laterais do parque e o chão.



**Figura 6.3** - Vista 3D da malha do domínio computacional: Paredes, grelhas dos ventiladores axiais, ventiladores de impulso e bloco de escadas

As condições de fronteira para o estudo do parque da Brisa são as seguintes:

- No chão, no tecto, nas diferentes paredes do parque, nos blocos das escadas e nas caixas do modelo de ventilador de impulso é imposta uma condição de aderência.
- Nas grelhas correspondentes aos ventiladores axiais é imposta uma condição de velocidade conforme o funcionamento (insuflação, extracção, registos fechados). A velocidade nas grelhas é imposta normal à fronteira.
- Nos ventiladores de impulso é imposta uma condição de velocidade nas duas faces. Na face de aspiração é imposta uma velocidade normal à face. Na face de insuflação é imposta uma velocidade normal à face e uma componente tangencial (swirl).

Nas simulações numéricas realizadas não são contabilizadas as perdas de carga existentes no sistema de desenfumagem do piso -4 do parque de estacionamento da brisa.

Recorreu-se ao auxílio de uma UDF (User Define Function), que permite impor as condições de velocidade nas secções de insuflação e extracção dos ventiladores de impulso. Permite também impor a temperatura nas secções de insuflação dos ventiladores de impulso. A temperatura do ar insuflado é de 20°C que corresponde à temperatura ambiente. O escoamento é considerado estacionário.

Condição limite imposta nos ventiladores:

Ventiladores de insuflação:

- É imposta uma velocidade de 6,48m/s para os ventiladores V2, V4 e V6.
- A intensidade de turbulência é de 5%.

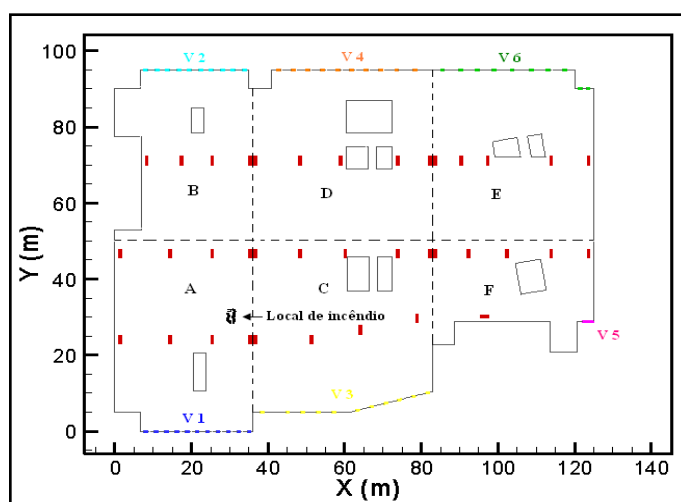
Ventiladores de extracção:

- É imposta uma velocidade de 5,89m/s para os ventiladores V1 e V3.
- O registo do ventilador V5 é considerado fechado para todas as simulações.

Ventiladores de impulso:

- É imposta uma velocidade axial de 18,3m/s na secção circular de aspiração assim como na face circular de insuflação.
- Na face de insuflação é também imposta a componente tangencial da velocidade de 11,25m/s determinada anteriormente.
- A intensidade de turbulência é igual a 5%.

O local de incêndio (figura 6.4) situa-se na zona virtual A. Nesta situação os ventiladores axiais, V2, V4 e V6, estão a insuflar e os ventiladores axiais situados no extremo oposto do parque, V1, V3 e V5 encontram-se em extracção. Os ventiladores de impulso encontram-se em funcionamento respeitando a direcção de escoamento imposta pelos ventiladores axiais.



**Figura 6.4** - Planta do piso -4 do parque de estacionamento: posição do local de incêndio

O incêndio é modelado através de uma fonte de energia de 4MW que pretende simular um veículo de volume 7,7m<sup>3</sup> que corresponde às dimensões 3m×1,7m×1,5m, em plena combustão no interior do parque. Este valor corresponde apenas à parte convectiva, ou seja, 70% da fonte de energia total. Para as respectivas simulações numéricas foi mantido inalterado o local de incêndio. Foi alterado apenas o funcionamento do sistema de ventilação/desenfumagem.

### 6.3 Influência do modelo de turbulência

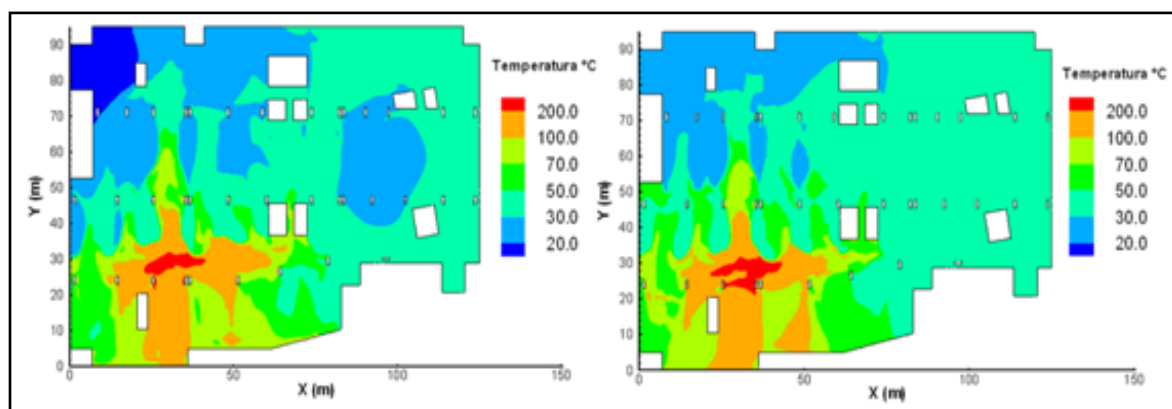
De modo a ser possível analisar a influência do modelo de turbulência utilizado, procedeu-se a simulações numéricas de modo a ser possível analisar a influência dos modelos de turbulência na propagação de gases quentes pelo interior do parque de estacionamento.

Os modelos de turbulência utilizados são os modelos utilizados no capítulo 5, parque simplificado, sendo eles, o modelo de turbulência *K-ε Standard* e *K-ε Realizable*.

As condições limite utilizadas para as simulações numéricas, são as condições utilizadas na 2ª configuração de incêndio, que são as seguintes:

- Energia libertada: 4MW.
- V1 e V3 em extracção a 100%: velocidade de 5,89m/s.
- V2 e V4 a insuflar a 100% velocidade de 6,48m/s.
- Os ventiladores axiais, V5 e V6 encontram-se fechados, é atribuída a condição de parede.
- Velocidade axial dos ventiladores de impulso: 18,3m/s. É imposta a componente tangencial da velocidade, 11,25m/s.
- Os ventiladores de impulso das zonas A, B, C e D encontram-se em funcionamento.

Na figura 6.5 apresenta-se a propagação dos gases quentes pelo interior do parque assim como a temperatura atingida no interior do parque, para os dois modelos de turbulência, *K-ε Standard* (configuração 2 do capítulo 6.4) e *K-ε Realizable*.



**Figura 6.5** - Comparação entre os modelos de turbulência: *K-ε Standard* e *K-ε Realizable* para a 2ª situação de incêndio: plano de referência  $z=2,75\text{m}$

Através da análise constata-se que a utilização de modelos de turbulência diferentes não origina uma influência relevante nos resultados obtidos.

Nas zonas críticas, que são as zonas onde é necessário proceder a uma rápida confinação e condução dos gases pelo parque de estacionamento, a propagação dos gases quentes é semelhante nos dois casos de turbulência. Verifica-se apenas uma ligeira diferença nas zonas virtuais adjacentes ao local de incêndio, zona E e zona F.

### 6.4 Estudo de diferentes configurações do sistema de desenfumagem

Através da simulação numérica é possível estudar várias configurações de funcionamento do sistema de desenfumagem, considerando no entanto, para o presente caso, que a localização dos ventiladores de impulso não é alterada.

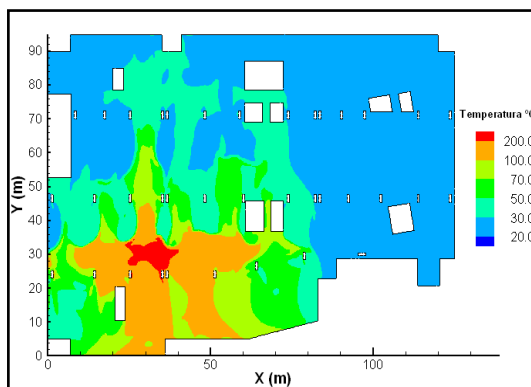
#### 6.4.1 1ª Configuração: V1 e V3 em extracção a 100%; V2 e V4 em insuflação a 65%

Para a respectiva simulação numérica foram utilizadas as seguintes condições limite, acrescidas às condições limite já mencionadas:

- V1 e V3 em extracção a 100%: velocidade de 5,89m/s.
- V2 e V4 a insuflar a 65%: velocidade de 4,212m/s.
- O ventilador axial, V5 encontra-se fechado, é atribuído a condição de parede.
- O ventilador axial, V6 não funciona, mas tem os registos abertos. É imposta uma condição de entrada livre. Não é contabilizada a perda de carga na conduta do ventilador.
- Os ventiladores de impulso que estão ligados (zona A, B, C e D) funcionam na velocidade máxima: velocidade axial de 18,3m/s e a componente tangencial da velocidade de 11,25m/s.

Na figura 6.6 está representada o campo de temperatura no piso -4 do parque. O plano escolhido é o plano horizontal que passa pelo centro das secções de aspiração/insuflação dos ventiladores de impulso que corresponde ao plano  $z=2,75\text{m}$ .





**Figura 6.6** - Campo de temperatura para a 1ª configuração de incêndio: plano horizontal  $z=2,75\text{m}$

Observa-se que, para a 1ª configuração de ventilação do piso do parque, os gases quentes encontram-se confinados. Os gases estão a ser conduzidos e direccionados pelo interior do parque até ao local da extracção. Não se assiste a uma propagação acentuada da temperatura no sentido contrário ao funcionamento dos ventiladores de impulso.

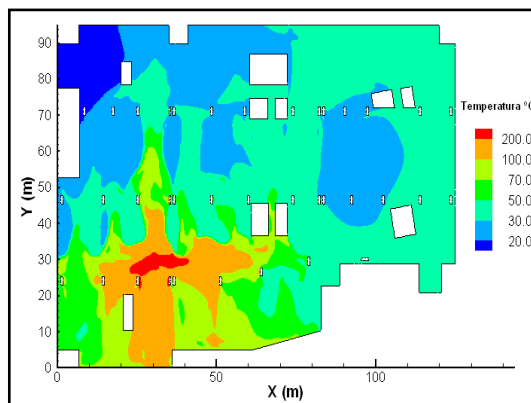
É de salientar a eficiência do sistema de ventilação, os gases quentes são confinados na zona onde ocorre o incêndio e nas zonas adjacentes (B, C e D) e não se propagam para as zonas mais afastadas, zona E e F.

#### 6.4.2 2ª Configuração: V1 e V3 em extracção a 100%; V2 e V4 em insuflação a 100%; V6 fechado.

Para a respectiva simulação numérica foram utilizadas as seguintes condições limite, acrescidas às condições limite já mencionadas:

- V1 e V3 em extracção a 100%: velocidade de 5,89m/s.
- V2 e V4 a insuflar a 100% velocidade de 6,48m/s.
- Os ventiladores axiais, V5 e V6 encontram-se fechados, é atribuída a condição de parede.
- Os ventiladores de impulso que se encontram em funcionamento (zona A, B, C e D) funcionam na velocidade máxima: a velocidade axial de 18,3m/s e a componente tangencial da velocidade é de 11,25m/s.

Na figura 6.7 está representado o campo de temperatura para a 2ª simulação numérica.



**Figura 6.7** - Campo de temperatura para a 2ª configuração de incêndio: plano horizontal  $z=2,75\text{m}$

Para as condições de funcionamento impostas nos ventiladores axiais observa-se a existência de uma recirculação de gases quentes no interior do parque, que se desenvolve nas zonas E e F. Esta recirculação deve-se ao facto de ter-se encerrado o ventilador axial V6.

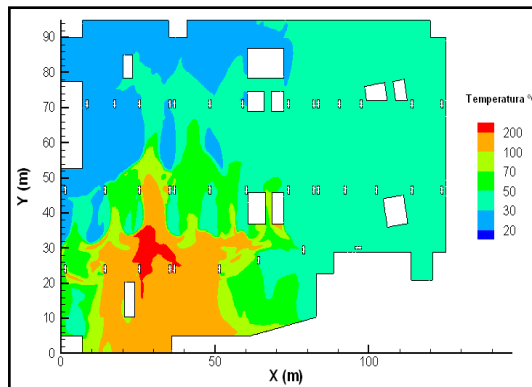
Observa-se que mesmo aumentando o caudal de insuflação dos ventiladores axiais das zonas B e D (ventiladores axiais V2 e V4) não se verifica um controlo mais eficaz na dispersão dos gases quentes pelo interior do parque.

### 6.4.3 3ª Configuração: V1 e V3 em extracção a 100%; V2 e V4 em insuflação a 100%; V6 aberto.

Na seguinte simulação numérica pretende-se determinar a influência do funcionamento do ventilador axial V6. As condições de funcionamento são idênticas às condições da configuração 2, que são as seguintes:

- V1 e V3 em extracção a 100%: velocidade de 5,89m/s.
- V2 e V4 a insuflar a 100%: velocidade de 6,48m/s.
- O ventilador axial, V5 encontra-se fechado, é atribuído a condição de parede.
- O ventilador axial, V6 não funciona, tem os registos abertos. É imposta uma condição de entrada livre. Não é contabilizada a perda de carga na conduta do ventilador.
- Os ventiladores de impulso que estão ligados (zona A, B, C e D) funcionam na velocidade máxima: a velocidade axial é de 18,3m/s e a componente tangencial da velocidade é de 11,25m/s.

Na figura 6.8 está representado o campo de temperatura (ou seja, a localização dos gases quentes) no interior do parque para a 3ª situação:



**Figura 6.8** - Campo de temperatura para a 3ª situação de incêndio: plano horizontal  $z=2,75\text{m}$

Da simulação numérica realizada observa-se não existir uma variação relevante na extensão de gases quentes pelo interior do parque comparando com a configuração 2. A colocação do ventilador axial, V6 em regime aberto, implica apenas o não surgimento da zona de recirculação de gases quentes. No entanto, verifica-se também, como na configuração 2, uma extensão dos gases quentes nas zonas adjacentes E e F, o que não acontece na configuração 1.

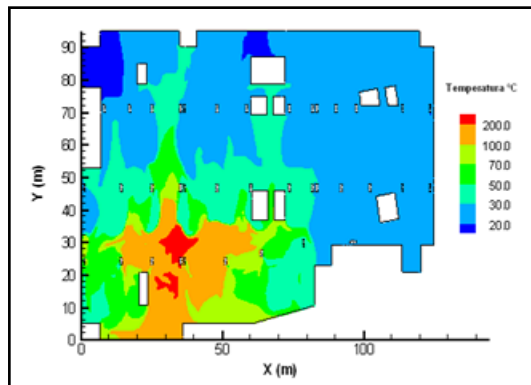
### 6.4.4 4ª Configuração: Ventiladores de insuflação e extracção a funcionar a 100% e os ventiladores de impulso todos em funcionamento.

Na simulação numérica seguinte pretende-se analisar o sistema de desenfumagem com os ventiladores axiais, de insuflação e os de extracção a funcionar à potência máxima, e os ventiladores de impulso todos em funcionamento, da zona A à zona F.

As condições limite utilizadas na simulação numérica são as seguintes:

- V1 e V3 em extracção a 100%: velocidade de 5,68m/s.
- V5 em extracção a 100%: com velocidade de 5,02m/s.
- V2, V4 e V6 a insuflar a 100%: com uma velocidade de 6,48m/s.
- Os ventiladores de impulso funcionam à velocidade máxima: é imposta a componente axial da velocidade de 18,3m/s e a componente tangencial da velocidade de 11,25m/s.

Na figura 6.9 está representado o campo de temperatura para a configuração utilizada para o sistema de desenfumagem.



**Figura 6.9** - Campo de temperatura para a 4ª situação de incêndio: plano horizontal  $z=2,75\text{m}$

Através da análise do campo de temperatura observa-se que a propagação dos gases quentes é similar à 1ª configuração utilizada para o sistema de desenfumagem do parque de estacionamento. Observa-se uma ligeira propagação dos gases a montante do local de incêndio e que os gases não se propagam para as zonas afastadas. O sistema confina os gases, conduz os gases pelo parque para junto dos ventiladores de extracção para posterior evacuação.

### 6.4.4 5ª Configuração: ventiladores de impulso, sem swirl

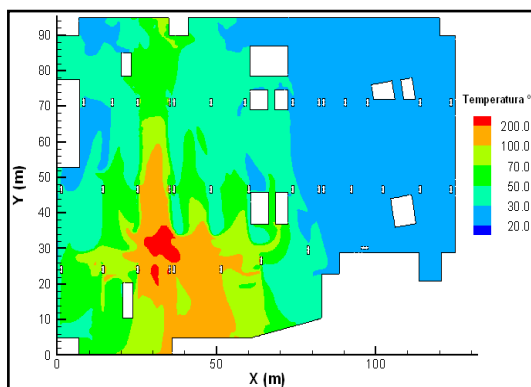
Nesta simulação, pretende-se analisar a influência da componente tangencial da velocidade, que existe na saída dos ventiladores de impulso, na propagação e expansão dos gases quentes, em caso de incêndio pelo parque.

Para esta simulação numérica foram utilizadas as condições limite usadas na 1ª simulação numérica, configuração 1, sendo as condições limite as seguintes:

- V1 e V3 em extracção a 100%: velocidade de 5,89m/s.
- V2 e V4 a insuflar a 65%: velocidade de 4,212m/s.
- O ventilador axial, V5 encontra-se fechado, é atribuído a condição de parede.
- O ventilador axial, V6 não funciona, tem os registos abertos. Uma condição de entrada livre é imposta. Não é contabilizada a perda de carga na conduta do ventilador.

- Os ventiladores de impulso que são ligados (zona A, B, C e D) funcionam na velocidade máxima: é imposta apenas a velocidade axial, que tem o valor de 18,3m/s.

Na figura 6.10 está representado o campo de temperatura. Os ventiladores de impulso contabilizam apenas a componente axial da velocidade.



**Figura 6.10** - Campo da temperatura em caso de incêndio: ventiladores de impulso em funcionamento sem swirl: plano  $z=2,75\text{m}$

A simulação numérica realizada tem como objectivo determinar a influência da componente tangencial da velocidade na dispersão de gases quentes no interior do parque.

Observou-se que, para a configuração 4, existe uma maior propagação dos gases quentes pelo interior do parque. Os ventiladores de impulso não conseguem confinar os gases nas zonas A e C e verifica-se a propagação dos fumos a montante do local de incêndio nas zonas B e D.

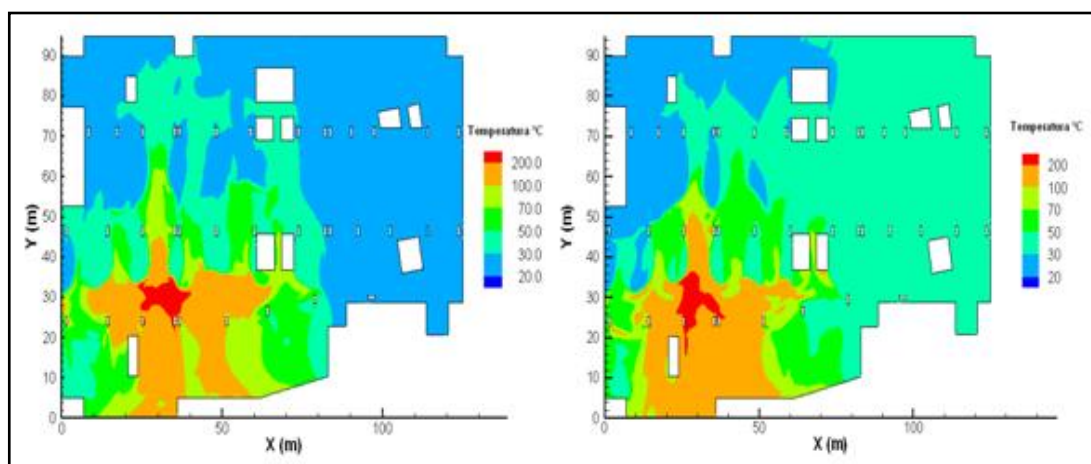
### 6.4.5 Conclusões

As simulações numéricas realizadas têm como objectivo determinar a configuração do sistema de ventilação mais eficaz em caso de sinistro no interior do parque.

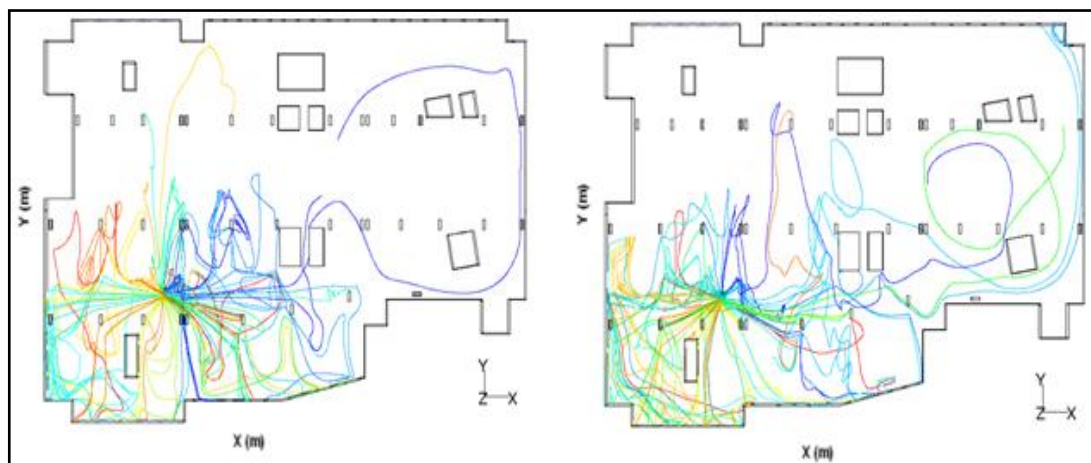
Em caso de incêndio, a melhor configuração de funcionamento do sistema de ventilação consiste em colocar os ventiladores axiais de insuflação, V2 e V4, em funcionamento a 65% da sua capacidade de funcionamento e com o registo do ventilador axial V6 aberto. Os ventiladores axiais V1 e V3, funcionam em extracção a 100% e o ventilador axial V5 encontra-se fechado. Deste modo, é imposto um fluxo de ar relativamente homogéneo no parque. Se os ventiladores de insuflação funcionarem a 100% e o registo do ventilador V6 se

encontrar fechado, não se assiste a um fluxo homogêneo de ar pelo parque, aparece uma zona de recirculação na zona onde os ventiladores de impulso e os ventiladores axiais se encontram fechados. Em consequência, os fumos propagam-se para esta zona.

As figuras 6.11 e 6.12 permitem comparar a expansão dos gases quentes para as duas configurações de funcionamento dos ventiladores axiais (configurações 1 e 3).



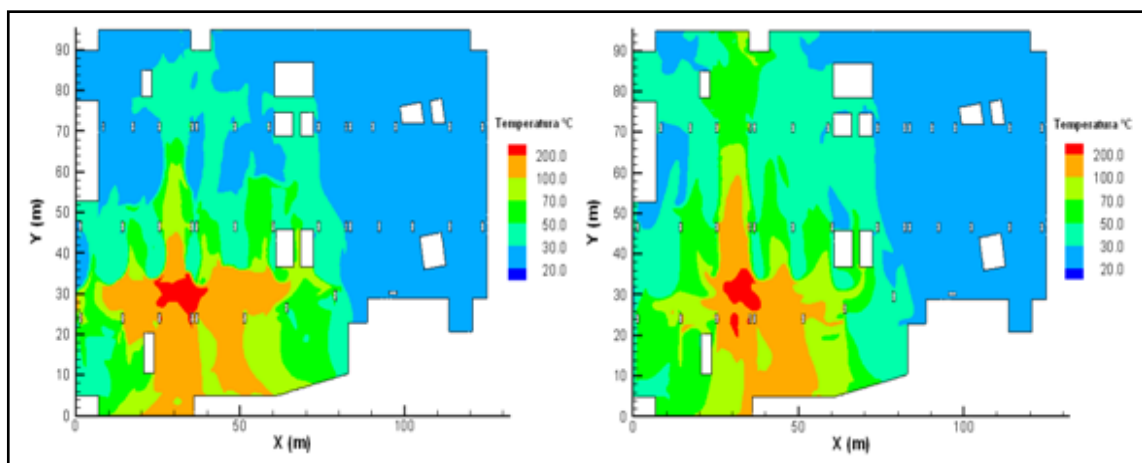
**Figura 6.11** - Comparação do campo de temperatura para os ventiladores axiais de insuflação: configuração 1 e 3.



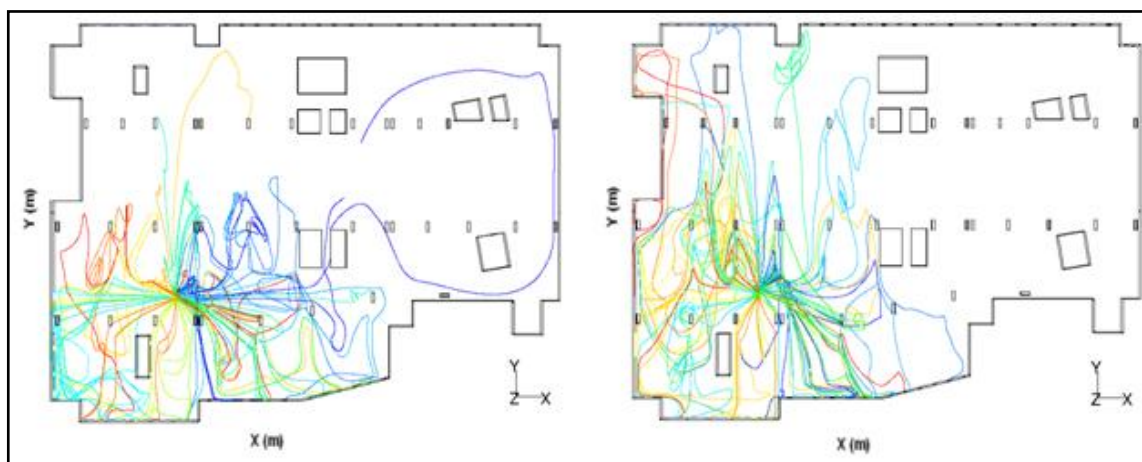
**Figura 6.12** - Comparação das linhas de corrente para os ventiladores axiais de insuflação: Configuração 1 e 3

As figuras 6.13 e 6.14 permitem comparar a propagação de gases quentes no interior do parque para duas configurações: Na primeira configuração, os ventiladores de impulso

funcionam contabilizando a componente tangencial da velocidade (swirl). Na segunda configuração a componente tangencial da velocidade é nula (jacto simples).



**Figura 6.13** - Comparação do campo de temperatura em caso de incêndio para os dois modelos numéricos de ventiladores de impulso: swirl / sem swirl



**Figura 6.14** - Comparação das linhas de corrente em caso de incêndio para os dois modelos numéricos de ventiladores de impulso: swirl / sem swirl

Observa-se que, em caso de incêndio, a expansão dos gases quentes a montante do local de incêndio é mais limitada quando a componente tangencial da velocidade (swirl) é incluída no modelo numérico dos ventiladores de impulso. Verifica-se assim que a abertura do jacto, produzida pelo swirl gerado pelos ventiladores de impulso, induz uma capacidade maior de confinamento dos gases quentes. Nesta situação os gases encontram-se essencialmente confinados às zonas a jusante dos ventiladores de impulso, nas zonas A e D. Verifica-se

efectivamente, que para a situação onde o swirl é desprezado, os gases quentes expandem-se com mais facilidade pelo parque, pelas zonas virtuais B e D a montante do local de incêndio. Esta comparação permite verificar a importância de considerar, nas simulações numéricas, a componente tangencial da velocidade induzida pelo ventilador de impulso.

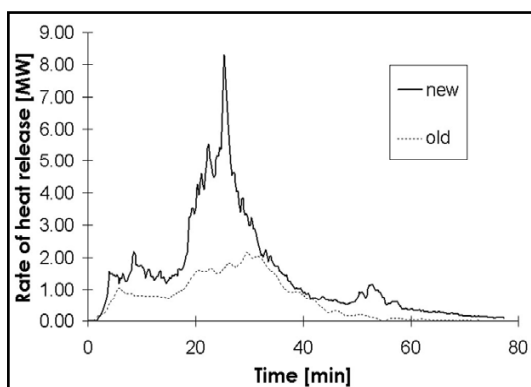
### 6.5 Regime não estacionário

As simulações em regime não estacionário permitem registar as evoluções dinâmicas de um escoamento ao longo de um período de tempo.

Nas simulações numéricas realizadas anteriormente optou-se por analisar os escoamentos em regime estacionário. A realização de uma simulação numérica em regime não estacionário (transitório) necessita de um tempo de cálculo elevado em comparação à mesma análise em regime estacionário. Devido a esta condicionante procedeu-se apenas a uma simulação numérica em regime não estacionário. Esta simulação transitória permite analisar a dispersão e expansão dos fumos ao longo do tempo, sempre através da evolução do campo de temperatura, em função da evolução do foco de incêndio no tempo, ou seja, da energia libertada ao longo do tempo. (International Fire Safety Engineering Technology, 2007) (figura 6.15).

A modelação numérica estacionária de um foco de incêndio consiste também em considerar uma fonte de energia de 4MW (no caso de um carro) constante no tempo. Este valor é relativamente grande quando se compara com a energia liberada ao longo do tempo (figura 6.15). A modelação numérica em regime transitório permite considerar as variações de fonte de energia no tempo e permite avaliar de maneira mais correcta a evolução do incêndio, particularmente no que diz respeito a propagação dos fumos, da evacuação dos fumos e, assim, ter uma noção mais eficiente do tempo de intervenção dos bombeiros.

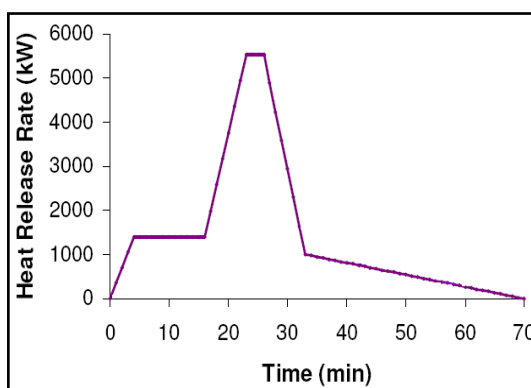




**Figura 6.15** - Taxa de libertação de calor VS tempo

A figura 6.15 apresenta a taxa de libertação de calor típica ao longo de um período de tempo para um carro dos anos 60 e um carro recente que envolve novos materiais. Pode-se constatar que os novos carros libertam uma energia superior aos carros dos anos 60, o que levou à alteração da legislação relativa aos critérios das fontes de energia, a considerar na elaboração de projectos de túneis ou de parque de estacionamento subterrâneos.

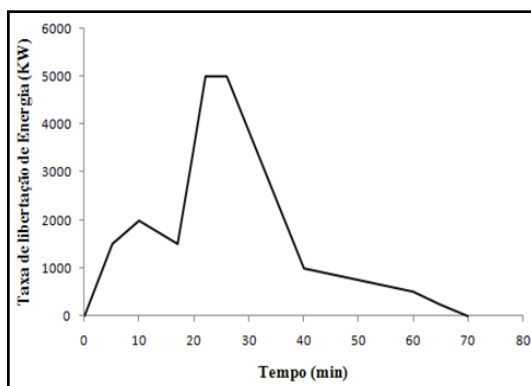
A Comissão Europeia, também é indicadora da curva da taxa de dissipação de calor (The University of Manchester, 2006). Trata-se de uma curva com carácter prático que permite utilizar uma curva típica de evolução de libertação de energia no caso de um incêndio de um carro moderno em meio fechado (figura 6.16).



**Figura 6.16** - Taxa de libertação de calor VS tempo, Comissão Europeia

É interessante analisar as diferenças que podem existir entre os resultados da modelação numérica em regime estacionário e em regime transitório, no fim de avaliar os erros que se pode cometer utilizando um modelo numérico estacionário. Com base nos documentos

apresentados anteriormente, impõe-se uma taxa de libertação de energia variável no tempo, conforme os critérios da comissão Europeia, apresentada na figura 6.17.



**Figura 6.17** - Taxa de libertação de calor Vs tempo, utilizado na simulação numérica

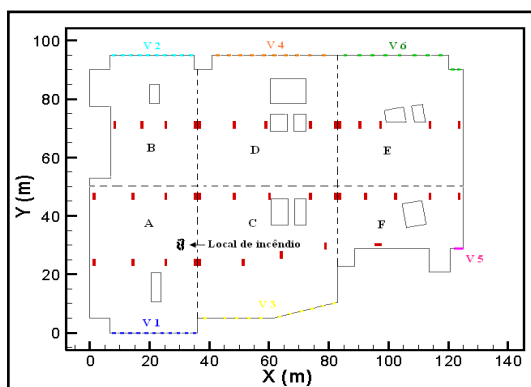
### 6.5.1 Dados da simulação numérica para o regime não estacionário

Para a análise numérica em regime estacionário, manteve-se as condições utilizadas nas simulações numéricas anteriores. As condições são as seguintes:

- Ventiladores V1e V3 em extracção a 100%.
- Ventiladores V2 e V4 em insuflação a 65%.
- O ventilador axial, V5 encontra-se fechado, é atribuído uma condição de parede.
- O ventilador axial, V6 não funciona, mas tem os registos abertos. Uma condição de entrada livre é imposta. Não são contabilizadas as perdas de carga nas condutas dos ventiladores axiais.
- Os ventiladores de impulso que estão ligados funcionam na velocidade máxima: a velocidade axial é de 18,3m/s e a componente tangencial da velocidade é de 11,25m/s na face de insuflação.

Considerou-se na modelação numérica que o ar é incompressível, a temperatura do ar insuflado e temperatura ambiente é de 20°C e que a variação de densidade do ar é calculada através da equação dos gases ideais.

O foco do incêndio situa-se no mesmo local das análises anteriores (figura 6.18). A energia libertada na simulação em regime transitório assume o valor de 5MW no máximo e considera-se a evolução temporal indicada na figura 6.17.



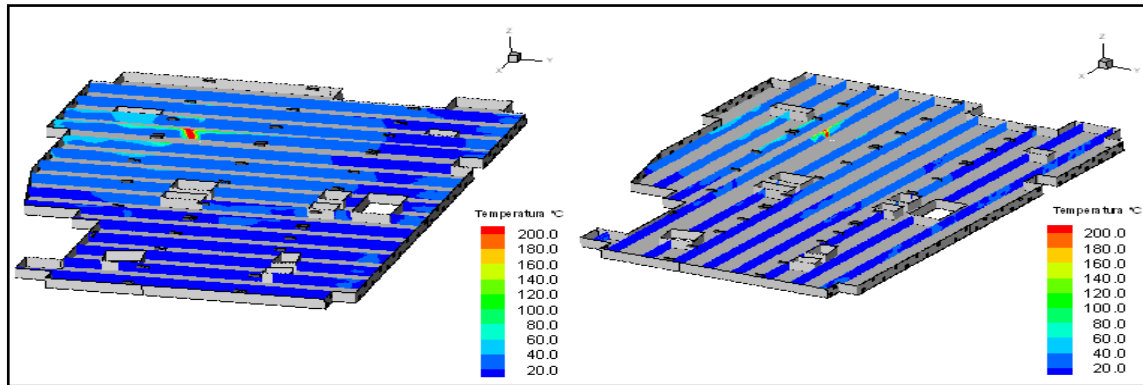
**Figura 6.18** - Local de incêndio

A quantidade de energia libertada ao longo do tempo é imposta através do ficheiro já mencionado, o ficheiro UDF (User Define Function). Este ficheiro permite impor a componente tangencial da velocidade na face de insuflação, assim como medir a média da temperatura na face de aspiração e impor esse valor na face de aspiração. Permite, para o regime transitório, impor a quantidade de energia libertada ao longo do tempo.

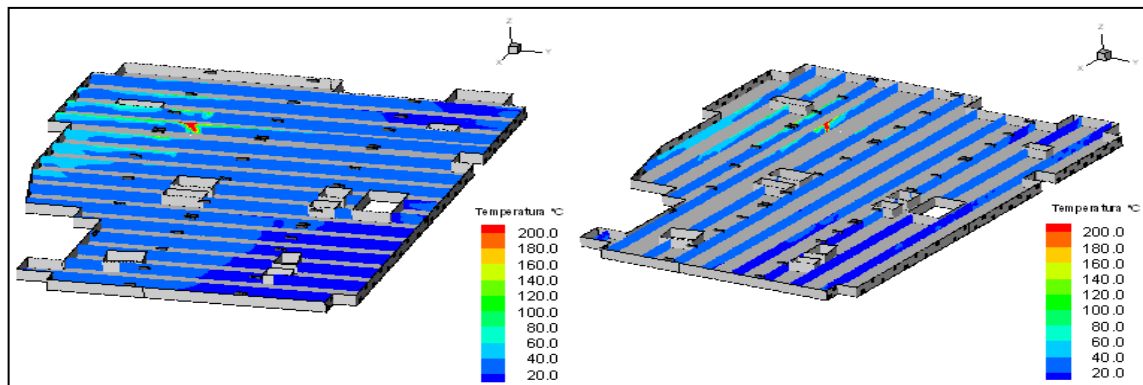
### 6.5.2 Resultados

A modelação numérica em regime transitório é realizada para um tempo de 60 minutos durante os quais decorre o incêndio com maior libertação de energia (Figura 6.12).

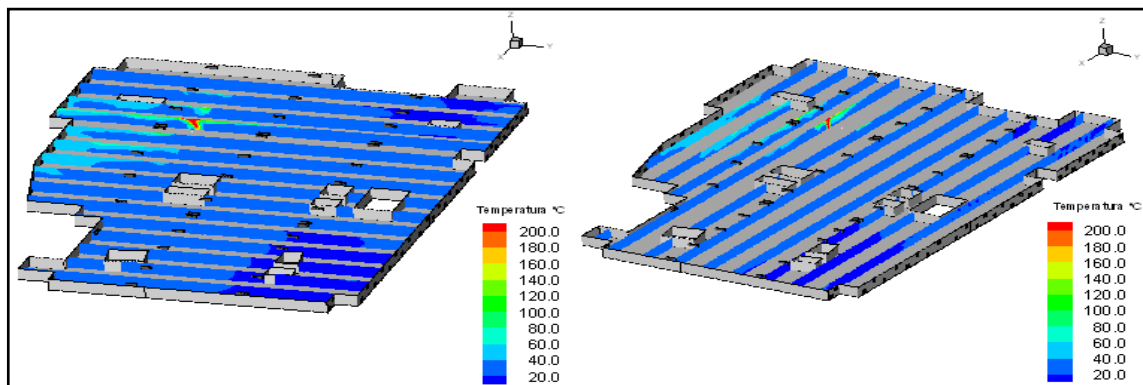
Nas figuras 6.19 até 6.28 está representada a evolução da temperatura ao longo do tempo, para cada 5 minutos, em vários planos verticais que possibilita visualizar a expansão dos fumos no piso -4 do parque.



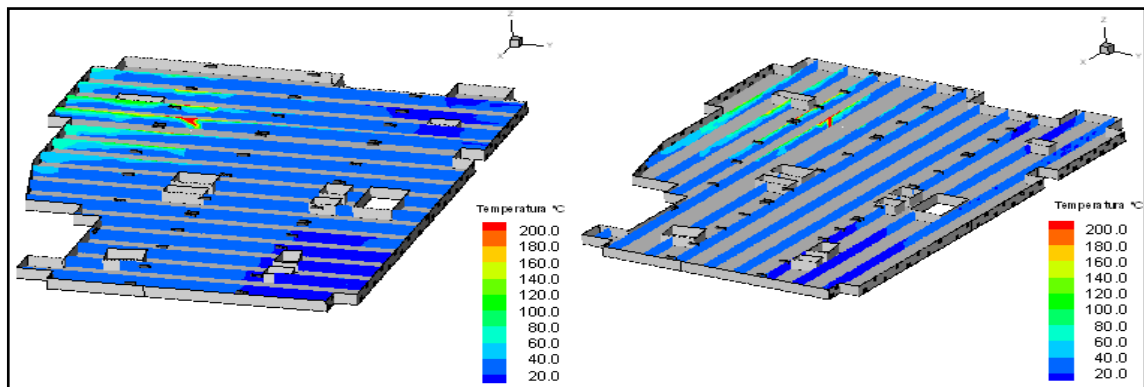
**Figura 6.19** - Campo de temperatura após 5min: planos xx e planos yy



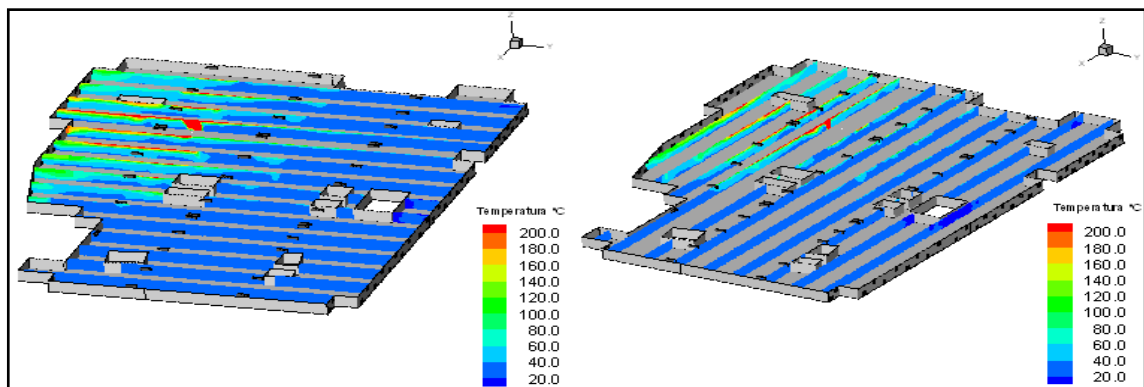
**Figura 6.20** - Campo de temperatura após 10min: planos xx e planos yy



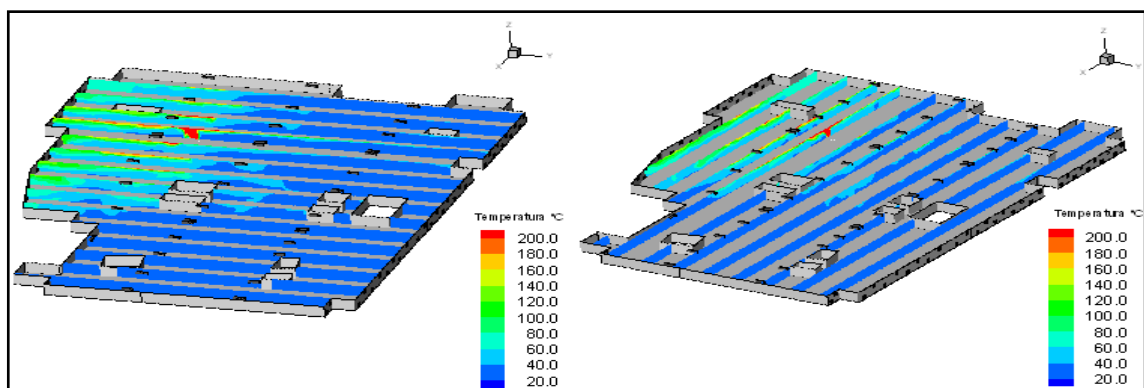
**Figura 6.21** - Campo de temperatura após 15min: Planos xx e planos yy



**Figura 6.22** - Campo de temperatura após 20min: Planos xx e planos yy



**Figura 6.23** - Campo de temperatura após 25min: Planos xx e planos yy



**Figura 6.24** - Campo de temperatura após 30min: Planos xx e planos yy

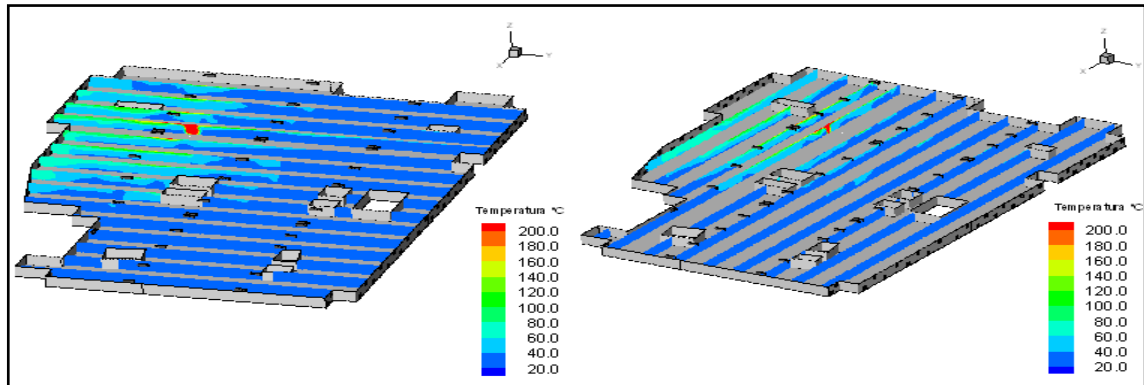


Figura 6.25 - Campo de temperatura após 35min: Planos xx e planos yy

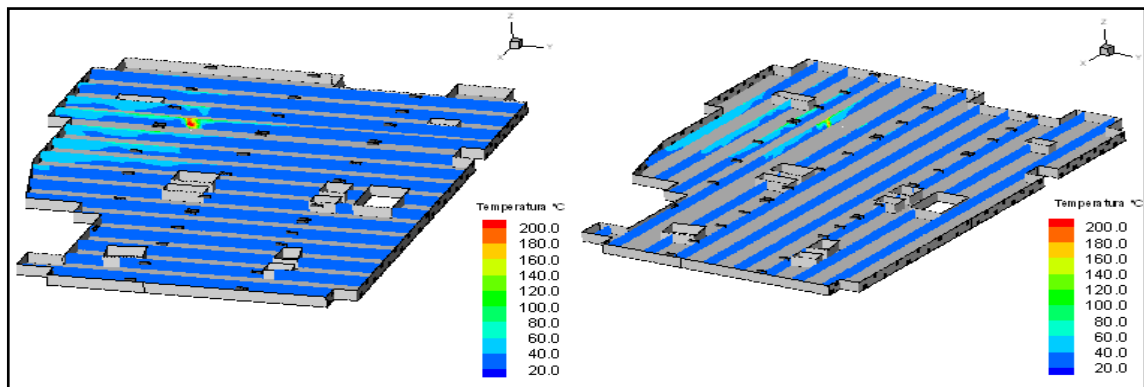


Figura 6.26 - Campo de temperatura após 40min: Planos xx e planos yy

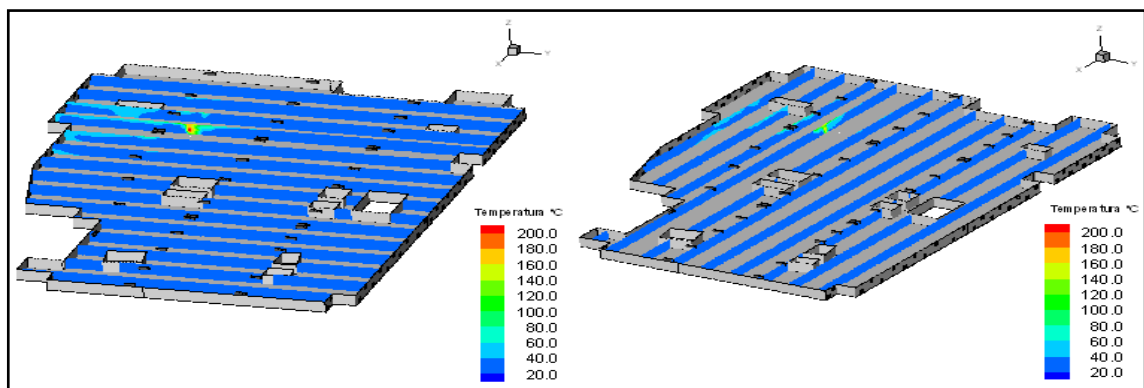
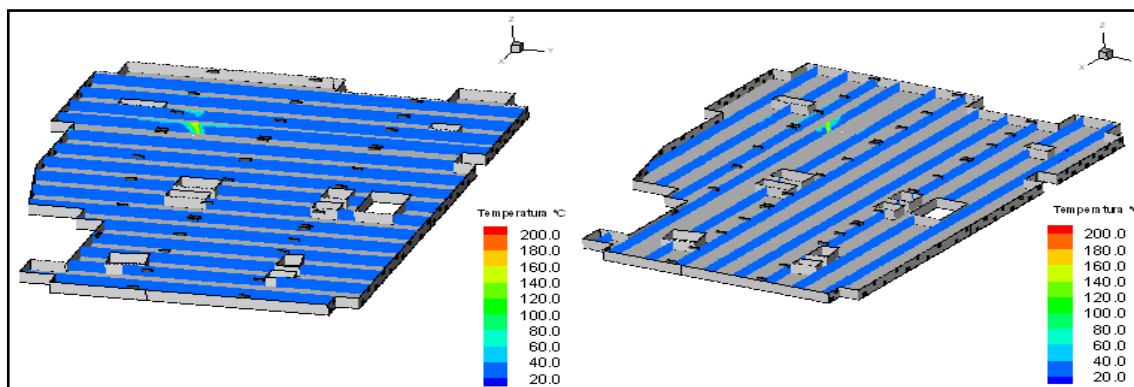


Figura 6.27 - Campo de temperatura após 45min: Planos xx e planos yy



**Figura 6.28** - Campo de temperatura após 50min: Planos xx e planos yy

Os resultados são apenas apresentados até 50 minutos, pois para tempos superiores observa-se apenas uma redução progressiva da expansão dos fumos devido à redução de energia libertada ao nível do foco de incêndio.

A expansão dos fumos no parque segue a variação de libertação de energia ao nível do fogo. A análise do campo de temperatura ao longo do tempo, permite verificar que a expansão dos gases quentes (e os fumos associados) é maior quando a libertação de energia ao nível do fogo atinge o seu máximo. As temperaturas locais, e do parque, aumentam também conforme a potência do fogo. Assim, verifica-se que a expansão máxima dos gases quentes ocorre entre 25 e 30 minutos depois do início do incêndio.

É assim evidente que a intervenção dos bombeiros no local do incêndio deve-se realizar antes de se atingir o máximo de energia libertada, a fim de reduzir as perdas materiais e tentar evitar a propagação do incêndio a outros veículos estacionados no parque.

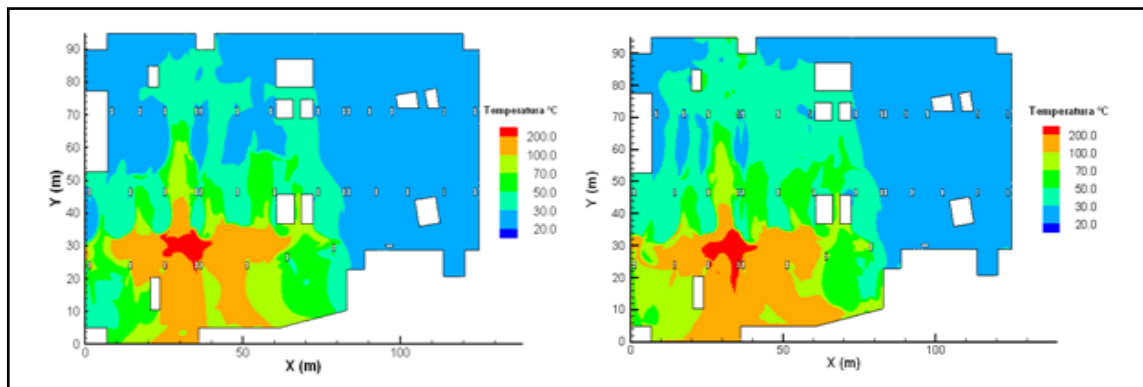
Verifica-se também que o sistema de desenfumagem permite assegurar a evacuação das pessoas presentes no parque quando se inicia o incêndio. A potência do fogo é relativamente pequena nesta fase inicial, à volta de 1.5MW. A análise do campo de temperatura mostra que a expansão dos fumos é reduzida e fica essencialmente localizada na zona A e C. Nota-se apenas uma camada fina de fumos a montante do local do foco de incêndio. Observa-se também que os fumos, a jusante do local do incêndio, ficam colados ao tecto.

### 6.5.3 Conclusões

As simulações numéricas que permitem analisar a desenfumagem de um parque de estacionamento subterrâneo podem ser realizadas em regime estacionário ou em regime transitório.

A simulação numérica em regime estacionário tem a particularidade da taxa de energia libertada ser constante, de 4MW, uma vez que para a simulação numérica em regime transitório, a libertação de energia varia com o tempo.

Na figura 6.29 está representado o campo de temperatura para a simulação numérica em regime estacionário e em regime transitório, neste ultimo caso para o tempo de 30 minutos.



**Figura 6.29** - Comparação do campo de temperatura: regime estacionário e regime transitório (30min).

Verifica-se, comparando o campo de temperatura para os dois regimes, que a expansão dos fumos obtida com a modelação estacionária é muito similar à obtida para a modelação transitória para tempos 25 – 30 minutos. Na modelação em regime transitório, nota-se uma ligeira expansão de fumos a montante do local de incêndio, devido, provavelmente, à fonte de energia que atinge o valor de 5MW, em vez dos 4MW impostos para a simulação numérica em regime estacionário.

A comparação permite também justificar a utilização do modelo estacionário, que requer um tempo de cálculo mais reduzido que o modelo transitório:

- Uma simulação em regime estacionário requer 48 horas (2 dias) aproximadamente.



- Em regime transitório são necessárias 120 horas (5 dias) aproximadamente para se obter resultados.



## 7. Conclusões

No presente trabalho, foram efectuadas simulações numéricas, que permitiram modelar e calibrar um modelo numérico simplificado de um ventilador de impulso, neste caso, um modelo da gama AXALU da empresa France-Air. A modelação e calibração do modelo numérico do ventilador de impulso consistem em quantificar a componente tangencial da velocidade, qualificada de swirl, na saída do ventilador de impulso. A componente tangencial da velocidade não é desprezável e produz uma abertura do jacto de ar gerado pelo ventilador de impulso, superior à abertura de um jacto simples (sem swirl).

No escoamento do ventilador de impulso estão incluídas duas componentes de velocidade, uma axial, depende do caudal, e uma componente tangencial (swirl), que foi determinada. Foram analisados factores que poderiam influenciar o escoamento quando é considerada a componente tangencial (swirl) no modelo numérico do ventilador de impulso:

- Pé direito, 2.5m e 10m.
- Malha fina e grosseira.

A variação do pé direito produz alterações no escoamento provido pelo modelo de ventilador de impulso. A escolha por um pé direito alto, 10m, origina, por parte do ventilador de impulso, um escoamento mais aberto, em relação ao pé direito de 2,5m. No entanto, devido à abertura do escoamento para o pé direito de 10m, observa-se que o alcance é ligeiramente reduzido em comparação com o alcance para um pé direito de 2,5m.

A calibração do modelo numérico de ventilador de impulso permitiu definir o valor da componente tangencial da velocidade, aproximadamente igual a 60% da sua velocidade axial.

Um parque simples, dito simplificado, constituído por 9 ventiladores de impulso, foi projectado no âmbito de analisar a resposta do modelo numérico na modelação da ocorrência de um incêndio no interior do parque.

As simulações numéricas permitem analisar a sensibilidade da modelação do incêndio quando são alterados alguns factores:

- Quantidade de energia libertada, 1MW e 4MW.
- Alteração do volume do foco de incêndio, conservando a fonte de energia de 4MW.
- Influência do pé direito, da malha e do modelo de turbulência.

Observa-se que para a quantidade de energia libertada de 1MW, a temperatura no parque não é elevada, atinge os 100°C no foco de incêndio. O sistema de ventilação confina e conduz os gases quentes para o extremo do parque, não permitindo a propagação a montante do foco de incêndio. Para a fonte de energia de 4MW, observou-se uma propagação dos gases quentes e tóxicos pelo parque e um aumento da temperatura. A sensibilidade do modelo, quando é simulado um incêndio, é analisada através do campo de temperatura, considerada relativamente semelhante, e da expansão dos gases quentes, utilizando a fonte de energia de 4MW e alterando o seu volume.

Quando se altera o volume da fonte de energia, observa-se uma concordância na expansão dos gases quentes e temperatura pelo parque. Verifica-se apenas uma diferença na temperatura no foco de incêndio. A temperatura aumenta quando se diminui o volume da fonte de energia.

Foi verificado que para o parque simplificado, a utilização dos modelos de turbulência *K -ε Standard* e *K -ε Realizable*, não gera uma diferença visível nos resultados obtidos.

O caudal induzido no parque simplificado é igual para os dois pés direitos analisados. Devido a este facto, e a área de entrada ser superior para o pé direito de 4,5m, a velocidade de entrada é inferior para o pé direito de 4,5m. Observou-se que quando se altera o pé direito, 2,5m para 4,5m, o campo de temperatura e a expansão de gases quentes também se altera. Para a situação de pé direito de 4,5m, a expansão dos gases quentes é superior, mas a temperatura é inferior. Quando o pé direito é de 2,5m, observa-se o contrário, ou seja, uma expansão reduzida associada a uma temperatura superior. Nos dois casos, a propagação dos gases quentes verifica-se junto ao tecto. Para a situação do pé direito de 4,5m, a pluma térmica tem uma pluma térmica superior, sensivelmente de 2,5m, à pluma térmica verificada para o pé direito de 2,5m, que é de 1,5m. Este facto é menorizado devido à altura livre disponível para a circulação de pessoas, que é de 2m para a situação de pé direito de 4,5m, em relação à altura disponível para circulação de pessoas para o pé direito de 2,5m, que é de apenas 1m. No entanto, a expansão a montante do foco de incêndio é menor para o pé direito de 2,5m do que para 4,5m. Devido à propagação dos gases quentes, para o pé direito de 4,5m assiste-se a uma

degradação dos materiais e da infra-estrutura superior em relação ao pé direito de 2,5m, onde os gases quentes são confinados e conduzidos para o exterior.

A alteração da malha não influencia os resultados das simulações numéricas. A expansão dos gases quentes, assim como a temperatura no parque, é similar para as duas malhas analisadas. Assim, para a modelação de incêndios em parques, a malha não precisa de ser demasiado fina, o que possibilita uma redução no tempo de cálculo.

Das várias simulações realizadas, verifica-se que os ventiladores de impulso têm a capacidade de confinar e proceder ao encaminhamento dos gases quentes ao longo do parque e posterior evacuação para o exterior. O sistema permite assim que, a montante do local de incêndio, não se observe uma variação significativa da temperatura, a temperatura observada é similar à temperatura ambiente. Observa-se apenas uma pluma térmica reduzida a montante e colada ao tecto.

Na fase final do trabalho, procedeu-se a simulações numéricas do piso de um parque de estacionamento real. As simulações numéricas permitem avaliar a eficiência do sistema de desenfumagem no caso de ocorrer um incêndio no parque. Consideram-se os requisitos impostos pelo projecto para as características dos ventiladores, assim como os obstáculos mais relevantes, como os blocos de escadas. A modelação numérica tem como objectivo definir a melhor configuração (matriz de comando) do sistema de ventilação para a extracção de fumos.

O sistema de ventilação é constituído por 37 ventiladores de impulso e por 6 ventiladores axiais (3 de cada lado). A melhor configuração para a desenfumagem em caso de incêndio, consiste em ligar os dois ventiladores axiais que insuflam a 65%, nas zonas virtuais opostas ao foco de incêndio enquanto o terceiro ventilador axial encontra-se com registos abertos. Dois ventiladores de extracção estão a funcionar 100% nas zonas virtuais próximas do foco de incêndio e o terceiro ventilador de extracção encontra-se com os registos fechados.

As simulações numéricas realizadas para determinar a melhor configuração do sistema de desenfumagem do piso do parque real confirmam a importância da componente tangencial da velocidade (swirl). O escoamento de ar induzido pelos modelos numéricos de ventiladores de

impulso, quando contabilizam o swirl, proporciona uma confinação e evacuação mais eficiente dos gases quentes e tóxicos no parque.

Verificou-se que, para as simulações numéricas para o piso -4 do parque da brisa, a utilização dos modelos de turbulência, *K - $\epsilon$  Standard* e *K - $\epsilon$  Realizable*, não gera uma diferença na propagação dos gases quentes passível de registo.

As simulações numéricas que permitem analisar a desenfumagem de um parque podem ser realizadas em regime estacionário ou em regime transitório. Nas simulações realizadas em regime estacionário a taxa de libertação de energia é constante, ou seja, impõe-se uma libertação de energia de 4MW. Para as simulações em regime transitório a taxa de libertação de energia varia com o tempo e tem como valor máximo para a taxa de energia libertada o valor de 5MW. Observa-se, analisando o campo de temperatura e a extensão dos gases quentes, que existe uma semelhança entre o resultado obtido em regime estacionário e o resultado obtido em regime transitório para 30 minutos após o início do incêndio, onde o campo de temperatura e a propagação dos gases quentes é máxima.

A comparação permite justificar a realização das simulações em regime estacionário em detrimento do regime transitório. As simulações realizadas em regime estacionário permitem um tempo de cálculo substancialmente reduzido comparando com as simulações realizadas em regime transitório, que assumem extrema relevância em projectos de engenharia.

## 8. Referências Bibliográficas

Ferziger J.H., Peric M. (1999), Computational Methods for Fluid Dynamics, New York, Barcelona, Hong Kong, London, Milan, Paris, Singapore, pp. 277-289.

France-Air (2007), Ventilação de parques de Estacionamento Jet Thrust System, comunicação interna, France Air.

FLUENT 6.2 User's Guide (2005), Fluent Incorporated.

LNEC (2009) Ensaios e análise comparativa de ventiladores de impulso.

Manchester University (2006), The suitability of fire-field modeling for enclosure fires involving complex solid fuel loads.

Ministère de l' Equipement des Transports du Logement du Tourisme et de la Mer (2003), Guide des Dossiers de sécurité des tunnels routiers, fascicule 4, Les etudes spécifiques des dangers (ESD), Centre d' Etdudes des Tunnels.

Morgan H.P., Vanhove B., DeSmedt J-C. (2007), On the Design of Impulse Ventilation for Smoke Control in Car Parks. Internal report of International Fire Safety Engineering & Technology S.A.

Reeves J.P. (2006), Car Parking Ventilation by Jet Thrust System, a comparison between ducted and impulse ventilation systems, comunicação interna, Flak Woods.

Veiga N., Coelho P.J., Viegas, J.C., Cruz H. (2009), Simulação numérica do escoamento resultante da interacção de uma pluma térmica com um jacto parietal induzido por um ventilador de impulso, Congresso de Métodos Numericos en Ingeniería, Barcelona, Espanha.

Viegas J.C. (2009), Utilização de ventiladores de impulso em parques de estacionamento cobertos, Congresso de Métodos Numericos en Ingeniería, Barcelona, Espanha.





## **9. Anexos**